

**DESARROLLO DE NUEVA CONFIGURACIÓN SISTEMA HÍBRIDO TANQUE
SÉPTICO-FILTRO ANAEROBIO PARA EL TRATAMIENTO IN SITU DE
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Presentado por:

Juliana Jaramillo Hurtado

Director

Dr. Diego Paredes Cuervo

Maestría en Ecotecnología

Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento - GIAS

Facultad de Ciencias Ambientales

Universidad Tecnológica de Pereira - UTP

Pereira, Risaralda

E-mail:

jjaramillo@utp.edu.co

1	RESUMEN.....	6
2	INTRODUCCIÓN	6
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
3.1	Justificación	8
3.2	Formulación del problema	9
3.3	Pregunta de Investigación	10
4	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
4.1	Objetivo General	11
4.2	Objetivos Específicos.....	11
5	HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	11
6	MARCO TEÓRICO.....	11
6.1	Generalidades.....	11
6.2	Etapas del tratamiento de aguas residuales	16
6.3	Procesos biológicos de oxidación anaerobia.....	16
6.4	Uso de tanques sépticos y filtros anaerobios de flujo ascendente en el tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales domésticas	20
6.4.1	Los tanques sépticos como solución en el saneamiento rural	21
6.4.2	Componentes de un tanque séptico.....	22
6.4.3	Filtro anaerobio de flujo ascendente	23
6.5	Sistemas híbridos.....	28
6.5.1	Antecedentes de los Sistemas Híbridos.....	29
7	METODOLOGIA	47
7.1	Definiciones.....	47
7.2	Descripción del experimento	47
7.3	Tipo de Medio Filtrante Usado	48
7.4	Arranque y operación de los sistemas	49
7.4.1	Programa de monitoreo	51
7.5	Diseño experimental.....	51
7.5.1	Disposición o combinación de niveles de los factores: Tratamientos.....	53
7.5.2	Modelo estadístico	54
7.5.3	Variables respuesta	55

7.6	Hipótesis estadísticas.....	56
7.6.1	Hipótesis en relación a los ANOVAS unifactoriales.....	56
7.6.2	Hipotesis en relacion al ANOVA multifactorial	56
7.6.3	Hipótesis al vincular las cargas orgánicas, como covariable dentro del modelo	57
7.6.4	Hipótesis de Validación de Supuestos para Aplicación de Técnicas Estadísticas ANOVA	58
7.7	Metodologías para alcance de objetivos	59
7.7.1	Metodología – objetivo específico #1	59
7.7.2	Metodología – Objetivo Específico # 2	62
7.7.3	Metodología – Objetivo Específico #3	63
7.8	Metodologías y técnicas estadísticas de análisis de información obtenida	64
8	PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	65
8.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 1. DISEÑO DE UN REACTOR HIBRIDO.....	65
8.1.1	Información general del ARD a tratar	65
8.1.2	Cálculo del volumen teórico y real del tanque séptico, C	65
8.1.3	Cálculo del volumen teórico total FAFA, C_{FAFA} y parámetros medio filtrante..	67
8.1.4	Dimensiones asumidas, cálculo del área y volumen aparente del empaque.....	67
8.1.5	Ajuste volumen total real del FAFA	68
8.1.6	Verificación parámetros de cargas en FAFA.....	68
8.1.7	Calidad estimada en el efluente del FAFA.....	70
8.1.8	Condiciones finales de adecuación del reactor	71
8.2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LAS DOS CONFIGURACIONES EXPERIMENTADAS.....	78
8.2.1	Análisis estadístico de variables respuesta % remoción (DBO_5 , DQO Y SST) y variables de salida (pH, temperatura, conductividad).....	80
8.3	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 3. DETERMINAR EL EFECTO DEL CAUDAL DEL AFLUENTE, TRADUCIDO COMO CARGA ORGÁNICA, FRENTE A LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO Y COMPARARLO CON LA CONFIGURACIÓN TRADICIONAL	92
9	CONCLUSIONES	99
10	RECOMENDACIONES	101
	Referencias.....	102

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de Proceso de Oxidación Anaerobia. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto.	
Tratamiento de Aguas Residuales.	19
Figura 2. Tanque Séptico Domiciliar una sola Cámara. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto.	
Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.	23
Figura 3. Tanque Séptico Típico. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.....	23
Figura 4. Detalle en Corte de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Fuente: Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento www.conagua.gob.mx	27
Figura 5. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto.	
Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.	27
Figura 6. Medios de Soporte o de relleno para filtración en reactores anaerobios. Fuente: Young James C. factors affecting the design and performance of up flow anaerobic filters, wat. Sci.tech Vol4 .1991.....	40
Figura 7. Flauta de distribución y medio filtrante	48
Figura 8. Esquema de los sistemas de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 9. Inoculación de los sistemas convencionales e híbridos	50
Figura 10. Diagrama del Diseño Experimental Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 11. Diagrama de Flujo de Cálculos y Estimación de Parámetros de Reactor Híbrido Fuente Propia	61
Figura 12. Vista en Corte frontal de Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA, medidas en metros. Dibujo sin escala. Fuente propia	73
Figura 13. Vista Superior de Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA y detalle Deflector. medidas en metros. Dibujo sin escala. Fuente propia.....	74
Figura 14. Sistema híbrido tanque séptico – filtro anaerobio ubicado en la Universidad Tecnológica de Pereira.....	74
Figura 15. Gráficos de líneas para los valores obtenidos en algunas variables de salida y las variables respuesta, medidas como % de remoción. Fuente Excel	82
Figura 16. Diagramas de Barras de Error con Intervalo de confianza para la media del 95% en las tres variables respuesta, usando el Factor Tipo de Reactor. Fuente SPSS	87
Figura 17. Diagramas de Barras de Error con Intervalo de confianza para la media del 95% en las tres variables respuesta, usando el factor Tiempo de retención Hidráulica (TRH). Fuente SPSS	88

Figura 18. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de remoción de DBO ₅ VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica, con inclusión y sin inclusión de covariable. Fuente SPSS	95
Figura 19. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de Remoción de DQO VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica. Fuente SPSS.....	95
Figura 20. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de Remoción de SST VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica. Fuente SPSS.....	96

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de investigaciones realizadas en Colombia de sistemas anaerobios.	30
Tabla 2. Estudio de sistemas híbridos en reactores anaerobios.	34
Tabla 3. Composición agua residual	45
Tabla 4. Valores Máximos o Límites Permisibles, Para Descargas a Cuerpos de Agua y Sistemas de Alcantarillado	46
Tabla 5. Programa de Monitoreo.....	51
Tabla 6. Resumen de Factores, Niveles, Nombres, Códigos de Tratamientos y Orden de Semanas de Experimentación	53
Tabla 7. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA.....	75
Tabla 8. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA.....	76
Tabla 9. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA.....	77
Tabla 10. Resumen de Valores Obtenidos en Variables Fisicoquímicas de Entrada a Sistemas de Tratamiento.	79
Tabla 11. Estadísticos Descriptivos para factores Tipo de Reactor y Tiempos de Retención Hidráulico, tomados de forma Independiente.	84
Tabla 12. Estadísticos F y P-Valores para comparación de promedios de % de remoción entre niveles de factores.	86
Tabla 13. Resultados Análisis de Varianza para Modelo Lineal Multifactorial, Nivel de significancia de prueba $\alpha = 0,05$	90
Tabla 14. Resultados Análisis de Varianza para Modelo Lineal Multifactorial, con efecto de la carga orgánica como covariable. Nivel de significancia de prueba $\alpha = 0,05$	93

1 RESUMEN

Este proyecto de investigación estudió la puesta en marcha y operación de un sistema híbrido Tanque Séptico y Filtro Anaerobio, donde se evaluó la eficiencia de remoción de esta configuración híbrida frente a una configuración convencional de un sistema tanque séptico y filtro anaerobio conectados en serie. Ambas configuraciones operaron simultáneamente llevando a cabo el tratamiento de aguas residuales, aprovechando las condiciones de sedimentación del tanque séptico y el favorecimiento de la descomposición de la materia orgánica en el filtro anaerobio. Para el caso de la configuración o reactor híbrido se buscó ocupar una menor área para la operación y obtener un efluente de mejor calidad reduciendo los costos de construcción y mantenimiento. La experimentación se realizó sobre configuraciones por duplicado, tanto para el sistema convencional como el híbrido. Se utilizó un diseño factorial considerando los factores, tiempo de retención, tipo de configuración y una covariable carga orgánica para evaluar y comparar el efecto sobre las eficiencias de remoción, en donde se midieron % de remoción de DBO₅, DQO y SST que fueron tomadas como variables respuesta. El desarrollo experimental permitió contrastar los resultados de los % de remoción característicos del agua residual doméstica tratada, encontrando % de remoción generalizados que se pudieron estimar entre un 40% y 50%; pero sin haber una discriminación clara a favor de alguna de las configuraciones, salvo en la configuración híbrida y sólo para el % de remoción de DBO₅. Por otro lado, la inclusión de la covariable en el análisis del modelo factorial permitió separar mejor el efecto de los tiempos de retención altos sobre los más bajos, siendo mejores en general los TRH de 30 h y 3 6h que los TRH de 18 h y 24 h.

2 INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua tanto a fuentes de agua superficial como subterráneas, debido a las descargas de agua residual doméstica (ARD) sin tratamiento preliminar, ha planteado un reto importante a nivel tanto mundial como regional y local implicando consecuencias serias para pequeñas poblaciones, que, tanto a nivel urbano como rural, pueden carecer de los suficientes recursos e infraestructura para hacer frente a esta problemática mediante soluciones tecnológicas avanzadas.

La presencia de múltiples comunidades dispersas y muy alejadas de los centros urbanos obliga a adoptar medidas para fomentar soluciones individuales que permitan a dichos hogares acceder a servicios aceptables de agua segura y saneamiento (BID, 2012). Conforme al RAS (2010), los sistemas de tratamiento in situ son una opción viable para el saneamiento en zona rural y en general se caracterizan por ofrecer los resultados de tratamiento requerido en la manera más práctica posible, sencilla, de fácil operación y de costo mínimo.

Entre los sistemas in situ de mayor aplicación se encuentran el tanque séptico y el filtro anaerobio y en los últimos años se han implementado estrategias que usan sistemas híbridos (Chernicharo, 2013) para optimizar aspectos como menores requerimientos de área y mayor simplicidad operacional. De esta manera se puede establecer la siguiente pregunta de investigación ¿Es posible que la configuración de un sistema híbrido tanque séptico - filtro anaerobio sea una alternativa viable y eficiente para que pueda ser adoptada por la población de las zonas rurales que busca llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales?

La solución al problema de tratabilidad de agua residual en zonas menos favorecidas por el desarrollo como las rurales o pequeños centros urbanos, puede plantear varios objetivos fundamentales, entre los cuales se establecieron en esta investigación:

- Diseñar un sistema híbrido compacto.
- Tener la oportunidad de comparar el desempeño de un reactor de este tipo, frente a un sistema convencional, mediante las eficiencias de remoción de contaminantes típicos de las ARD.
- Poder establecer si el caudal traducido en carga orgánica afecta de manera apreciable el desempeño de las configuraciones, especialmente la del sistema híbrido al ser comparado con el sistema convencional.

En este sentido, en este estudio se aborda una propuesta tecnológica simple, viable y eficiente para tratar ARD provenientes de pequeñas poblaciones. En primer lugar, se llevaron a cabo las investigaciones bibliográficas y la búsqueda de los soportes técnicos necesarios que permitió obtener los fundamentos básicos para diseñar un sistema híbrido que integrará en una sola unidad el tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente – FAFA. Además,

se compararon dos configuraciones de Tanque Séptico y filtro anaerobio operando en serie, así como soluciones integradas operando de manera híbrida las cuales han sido alternativas que se han usado con buenos resultados como tratamiento primario y secundario en la depuración de aguas residuales.

Los resultados obtenidos muestran tanto los sistemas híbridos como convencionales pueden remover con una eficiencia aceptable la materia orgánica medida como DBO₅, DQO y SST.

Los % de remoción obtenidos de manera muy general son similares a los reportados en la literatura y fluctuaron entre el 40% y 50% siendo estas remociones más influenciadas por los tiempos de retención que por el tipo de configuración. Esto da un primer indicio que los reactores híbridos son una buena alternativa por ser unidades compactas y de poca ocupación de espacios.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

3.1 Justificación

A pesar de que en Colombia se ha avanzado en los últimos años en el aumento de la cobertura del servicio de alcantarillado, esta se ha extendido mayormente en los cascos urbanos de los municipios, pues según el censo del DANE del año 2005 se reportó que si bien el 89% de las viviendas en las cabeceras municipales están conectadas al sistema de alcantarillado, en las viviendas rurales tan solo el 15% poseen el servicio, el 42% están conectadas a tanque séptico, aproximadamente el 12% tienen letrina y el 32% no tienen servicio sanitario (ENA, 2014) .

Debido a esto, los vertimientos generados por las viviendas rurales, en su mayoría dispersas y en ocasiones ubicadas en la zona alta de las microcuencas generan problemas de contaminación hídrica que limita los usos del agua para los habitantes de las partes media y baja de la misma, igualmente cuando el vertimiento se realiza en el suelo ocasiona contaminación sobre otras fuentes de abastecimiento, como es el agua subterránea. En este sentido, surge la necesidad de un tratamiento *in situ* de las aguas residuales, para reducir la

contaminación del agua en estas zonas, que no se encuentran conectadas a los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales (Luostarinen y Rintala, 2005).

Actualmente los sistemas de tratamiento más empleados en zona rural son los tanques sépticos los cuales son uno de los sistemas más antiguos y altamente difundidos, algunas veces seguido de un filtro anaerobio (FA) para alcanzar un efluente de mejor calidad; en este sistema los sólidos sedimentables se eliminan en el primer tanque y parte de la fracción orgánica es digerida en el fondo. La fracción orgánica soluble es tratada en el FA en el cual tan sólo se remueve la materia orgánica; la remoción de coliformes es muy baja y dependiendo del medio filtrante del FA, se puede retener un número significativo de huevos de helmintos (Van Haandel *et al.*, 2006). Sin embargo, este sistema de tratamiento no ha tenido mayores modificaciones desde hace más de un siglo (Butler y Payne, 1995) y por esto, es que en ocasiones no gozan de buena aceptación por presentar problemas de malos olores y colmatación, debido a la falta de mantenimiento por parte de sus propietarios siendo relegados por ser considerados obsoletos.

Es por esta razón que existe la necesidad de evaluar otras tecnologías para la remoción de contaminantes como materia orgánica y sólidos presentes en ARD. Este análisis es importante porque permite estimar si la implementación de un sistema híbrido como el propuesto en esta investigación, es viable para el mejoramiento de la calidad del agua y para ser usado como una alternativa que se ajuste a la creciente población, a sus necesidades económicas y sobre todo que permitan la prevención de daños ambientales.

3.2 Formulación del problema

La contaminación del agua es un problema global importante. Una de las principales causas de la contaminación del agua subterránea es el efluente de los tanques sépticos. El tratamiento de las aguas residuales domésticas utilizando un tanque séptico convencional se considera ineficiente y conduce a un aumento de la contaminación del suelo y las aguas subterráneas. Es muy importante proteger las aguas superficiales y subterráneas de la contaminación (Anil y Neera, 2016). Y es por esto que la gestión sostenible de este recurso

es una cuestión prioritaria en la sociedad en la que vivimos. Es importante disponer de un agua con una calidad adecuada y que se encuentre en cantidad suficiente para poder soportar las actividades derivadas del desarrollo, lo que permitirá una mejora en el medio ambiente, la salud y la calidad de vida (García *et al.*, 2006).

Específicamente, las tecnologías desarrolladas para el tratamiento *in situ* de aguas residuales domésticas (ARD) se han venido implementando desde hace más de un siglo sin mayores modificaciones en su diseño, existiendo pocas alternativas innovadoras disponibles y que se ajusten a las condiciones económicas de la población en zona rural. El sistema de tratamiento de ARD que predomina en la zona rural de Colombia es el tanque séptico, el cual según Butler y Payne (1995) consiste en un tanque destinado a proporcionar condiciones de reposo para el asentamiento de los lodos y el desarrollo de condiciones anaeróbicas para la descomposición de la materia orgánica, pudiendo tener variedad de formas y configuraciones.

Frente a este panorama, se evidencia la necesidad de continuar con el desarrollo y mejoramiento de tecnologías para el tratamiento *in situ* de las aguas residuales domésticas, con el fin de brindar alternativas de solución a la problemática de contaminación hídrica, que a su vez, se ajusten a las condiciones sociales y económicas de las comunidades rurales.

3.3 Pregunta de Investigación

¿Es posible que la configuración de un sistema híbrido tanque séptico - filtro anaerobio sea una alternativa viable y eficiente para que pueda ser adoptada por la población de las zonas rurales que busca llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales?

4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Objetivo General

Evaluar la configuración del sistema híbrido tanque séptico-filtro anaerobio frente al sistema convencional para el tratamiento de aguas residuales.

4.2 Objetivos Específicos

- 4.1.1** Implementar un reactor híbrido que combine tanque séptico con filtro anaerobio en una sola unidad de tratamiento.
- 4.1.2** Determinar las eficiencias de remoción de contaminantes característicos del ARD (materia orgánica y sólidos) en el sistema híbrido tanque séptico – filtro anaerobio y compararlo frente al sistema convencional.
- 4.1.3** Determinar el efecto del caudal del afluente, traducido como carga orgánica, frente a la eficiencia de remoción del sistema híbrido y compararlo con la configuración tradicional.

5 HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN.

A medida que disminuye la carga orgánica, el sistema híbrido Tanque séptico - Filtro anaerobio logra mayores eficiencias de remoción de materia orgánica y sólidos presentes en el ARD en comparación al sistema convencional (serie tanque séptico-filtro anaerobio).

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Generalidades

Las aguas residuales domésticas se definen como aquellas aguas de desecho inevitables de las actividades humanas que proceden de la utilización del agua en actividades como alimentación, higiene personal y que provienen de casas de habitación, residencias, edificios

comerciales o institucionales. Suelen denominarse también como aguas negras y/o grises en virtud de su procedencia de inodoros, tinas, duchas, lavamanos, lavadoras, con lo que aportan a las fuentes de agua natural excrementos humanos, orina, sólidos suspendidos, nitrógeno, coliformes fecales, grasas, DBO, fósforo.

Los diferentes tipos de agua residual toman su nombre según su origen o estado de descomposición, lo cual a su vez está relacionado directamente con el consumo de oxígeno.

Según procedencia las aguas residuales pueden ser domésticas, municipales, comerciales, industriales, agrícolas, pluviales o combinadas. De acuerdo con el estado de descomposición pueden clasificarse como frescas, sépticas o estabilizadas.

Algunas de estas aguas se descargan a sistemas de tratamiento, como también a sistemas de alcantarillado con lo que contaminan e impactan fuentes hídricas superficiales, subterráneas y suelos, siendo de esta manera, potenciales contaminantes de fuentes de abastecimiento de agua potable, aguas de riego o de recreación, entre otros.

Estas problemáticas ambientales han conllevado al diseño, construcción y desarrollo de sistemas para el tratamiento de aguas residuales, dentro de las cuales sobresalen las metodologías biológicas para su depuración. Estos tratamientos biológicos implican la remoción de sustancias principalmente orgánicas, biodegradables, coloidales o disueltas en el agua residual mediante la conversión de gases como metano, gas carbónico, ácido sulfhídrico y biomasa, que puede ser extraída por sedimentación. Eventualmente el proceso puede llevar a la conversión exclusiva del material orgánico en gas carbónico, nitrógeno amoniacal, nitratos, orto fosfatos y agua, proceso que se conoce como mineralización y es característico de la descomposición microbiológica aeróbica de carbohidratos y lípidos donde el oxígeno libre es el único aceptor de electrones, el oxígeno se reduce y el carbono de la materia orgánica es oxidado.

La presión ambiental en Colombia mediante la normativa de “Vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público” aunados a la presión social, política, y legislativa, buscan minimizar y prevenir la contaminación a fuentes hídricas, es así, como a través de la resolución 0631 de 2015 se actualiza el decreto 1594 de 1984 y se reglamenta el artículo 28 del decreto 3930 de 2010. Mediante esta normativa, se

busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a ríos, lagunas y al sistema de alcantarillado público, entre otros.

Para el mayor entendimiento de los sistemas de tratamiento de agua residual, presentamos algunas definiciones de parámetros manejados en procesos biológicos e ingeniería ambiental aplicados en tratamientos de aguas residuales, estos son de mucha utilidad y deben definirse previamente:

Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO: Medición indirecta de la materia orgánica. Es la cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica presente en el agua residual, por acción de microorganismos a condiciones de tiempo y temperatura específicos (usualmente 20 Celsius y 5 días), también puede ser identificada como concentración de sustrato S_o , especificándose si se trata de concentración de DBO, DQO o SST.

Demanda Química de Oxígeno DQO: Medida de la cantidad de oxígeno requerida para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando oxidantes como el permanganato o dicromato de potasio en medio ácido y a alta temperatura. Es una medida indirecta de la materia orgánica degradable y no biodegradable del agua.

Sólidos Suspendidos, SS: Corresponden al material particulado contenido en el agua y que se retiene en un filtro de 0,45 μm (micras) y permanece al evaporar el agua entre 103 y 105 grados Celsius

Tiempo de Retención Hidráulica, TRH o Θ : Tiempo Medio que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil, medido en días, horas o cualquier otra unidad de tiempo.

Tasa de Acumulación de Lodos, K_Q : Volumen de lodos producido por persona servida por año, $\text{m}^3/\text{c año}$

Capacidad Total del Tanque, C: Volumen total de un tanque séptico en m^3 , objeto de diseño en muchos de los cálculos de sistemas de tratamiento que usan fosas sépticas.

Capacidad Máxima Estimada de Almacenamiento de lodos, C_L : Máxima capacidad de acumulación de lodos en el sedimentador de un tanque séptico, m^3 .

Caudal, Q : Volumen en la unidad de tiempo, puede ser medido como m^3/d , L/s ...etc. Puede ser medido con relación a la entrada o salida de un sistema (Afluente o Influyente), o con relación a un caudal de diseño.

Carga Orgánica Contaminante, CO : Producto de la concentración media de DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio, expresado en unidades de masa entre unidades de tiempo, $Kg\ DQO/d$

Carga Orgánica Volumétrica, COV o L : Definida como la carga orgánica por unidad de volumen; depende de la temperatura ambiente, medida como $Kg\ DBO/m^3d$. También se puede concebir como la relación entre la masa de un contaminante por unidad tiempo y de volumen.

Carga Orgánica Superficial, COS : Relación entre la masa del DBO por unidad de tiempo y por unidad de superficie, medida como $Kg\ DBO/m^2d$, se puede calcular en base con la masa de cualquier otro contaminante y denominarse genéricamente Carga Superficial.

Carga Hidráulica volumétrica, CH : Se define como el volumen de agua a tratar, por unidad de superficie por unidad de tiempo m^3/m^2d . Se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento. También puede entenderse como el caudal volumétrico (m^3/d) por unidad de área (m^2) lo cual se traduce en los metros cúbicos de agua aplicados diariamente por metro cuadrado de superficie.

Edad de Lodos o tiempo de residencia Celular Medio, Θ_c : Relación entre la masa de microorganismos de un sistema y la masa de microorganismos eliminados por unidad de tiempo medido como $Kg/(Kg/d)$ o días (d).

Remoción, R: Relación entre la cantidad eliminada de un contaminante y el valor de entrada del contaminante al sistema de tratamiento. Puede medirse frecuentemente también como Eficiencia de Remoción (%) multiplicando la remoción por 100. Nos indica el rendimiento o progresó en la eliminación de los contaminantes.

Constante Cinética de primer Orden, K: Coeficiente que controla o gobierna la tasa de desaparición de un contaminante dentro de un reactor o sistema de tratamiento de agua y mantiene la proporcionalidad entre esta tasa de desaparición y la concentración del sustrato, medido como el inverso del tiempo d^{-1} .

Número de Contribuyentes o población servida, c o P: Cantidad de usuario de un sistema de tratamiento de aguas residuales medido como número de personas.

Dotación: Cantidad de agua asignada a cada habitante o contribuyente (c) y por día, a fin de satisfacer sus necesidades personales en un día promedio anual. Consumo diario promedio per cápita, medida como $L/c\ d$

Velocidad Hidráulica, u: Velocidad del fluido medido en m/s

Velocidad Ascensional, Vasc: Velocidad de ascenso del líquido afluente o influente al sistema de tratamiento, medido en m/s

Área Superficial A_s : Medida en m^2 . Corresponde al área perpendicular al sentido de flujo dentro de un reactor, y se define como el caudal volumétrico dividido por la velocidad, para el caso de filtros anaerobios de flujo ascendente la velocidad corresponde a **Vasc**

Porosidad de Medio Filtrante, Φ : Fracción de volumen de huecos en un material con relación al volumen total medido en unidades de fracción o %.

Área Superficial Específica, A_{se} : Superficie de un medio filtrante con relación a su volumen total, medido en m^2/m^3 .

6.2 Etapas del tratamiento de aguas residuales

Normalmente el tratamiento integral de aguas residuales conlleva a la aplicación de diferentes etapas, como son:

- **El Pretratamiento:** Proceso de desbaste para eliminación de sólidos gruesos en suspensión, grasas y aceites o procesos de desarenado que evitan la obstrucción con material grueso de las etapas subsiguientes de tratamiento.
- **Tratamiento Primario:** Se emplean procesos de coagulación y operaciones de sedimentación para eliminar aproximadamente, el 60% de los sólidos suspendidos y el 30% de la materia orgánica.
- **Tratamiento secundario:** Enfocado en la eliminación de materia orgánica (DBO) y sólidos suspendidos, que no fueron eliminados en el tratamiento primario, utiliza procesos de precipitación, coagulación, floculación y además procesos biológicos, donde los principales factores son las bacterias, que modifican el sustrato orgánico por medio del crecimiento y acción de la biomasa.
- **Tratamiento terciario o avanzado:** Su objetivo es remover nutrientes, compuestos tóxicos, excesos de materia orgánica, sólidos suspendidos mediante filtración, coagulación, desnitrificación, absorción por carbón, intercambio iónico, osmosis inversa o desinfección

6.3 Procesos biológicos de oxidación anaerobia

A diferencia de los procesos aerobios, muchos de los procesos de descomposición microbiana sobre la materia orgánica, son llevados a cabo en ausencia de oxígeno libre y son denominados procesos de fermentación o anaerobios, los cuales fueron definidos por Pasteur como la vida en ausencia de aire (*Romero Rojas Jairo Alberto, 1999 pg. 233*). Dentro de los procesos anaerobios el crecimiento de la biomasa a expensas de la degradación del sustrato

orgánico proveniente de las aguas residuales, puede ser de varios tipos, crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido a algún soporte físico o medio de filtración o una combinación (híbrido) de biomasa suspendida y biomasa adherida, de igual manera estos procesos también se pueden tipificar dependiendo del régimen de flujo predominante pudiendo ser de flujo continuo, intermitente, mezcla completa, flujo pistón o flujo arbitrario.

Los sistemas de tratamiento anaeróbicos presentan la ventaja de que la tasa de crecimiento microbiano es mucho menor que en sistemas biológicos aerobios, lo cual se traduce en una menor producción de lodos, además de un menor costo energético, sumado a la producción de gas metano, el cual puede ser usado como combustible.

Proceso Anaerobio

El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo degradan la materia orgánica en etapas sucesivas: la de hidrólisis-acidogénesis, la de homoacetogénesis-acetogénesis y por último la de metanogénesis (Ruiz *et al.*, 2001).

En el sistema anaerobio los sólidos son atrapados y la materia orgánica se convierte en biogás que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono, el nitrógeno ligado orgánicamente se convierte en amonio y el sulfato se reduce a sulfuro de hidrógeno. La producción de lodos en los sistemas anaerobios es baja y el exceso de lodo se digiere y se puede deshidratar generalmente por lechos de secado. En cuanto a los indicadores microbiológicos la eficiencia de remoción de coliformes es baja (Kassab *et al.*, 2010). La digestión anaerobia se utiliza tanto para el tratamiento de residuos como para el tratamiento de aguas residuales y hoy en día es considerada como una tecnología consolidada con más de 2.200 reactores de alta tasa implementadas en todo el mundo (Donoso-Bravo *et al.*, 2011).

Un gran número de digestores anaerobios se han construido y estudiado, siendo los de alta tasa los más empleados en el tratamiento de aguas residuales, ya que, a diferencia de los digestores anaerobios convencionales, tales como lagunas anaerobias y tanques sépticos, los de alta tasa están diseñados para funcionar a tiempos de retención hidráulicos (TRH) cortos

y largos tiempos de retención de sólidos (SRT), así como para incorporar grandes cantidades de biomasa de alta actividad, lo que permite mejorar la estabilización de los lodos y mayor capacidad de carga (Chong *et al.*, 2011).

La calidad y cantidad del inóculo para un reactor anaerobio son dos de los principales factores que definen la duración del período de arranque en el cual la biomasa activa crece, adquiere buenas propiedades de sedimentabilidad o adherencia y logra considerables eficiencias de remoción de la materia orgánica. Este tiempo será corto si el lodo utilizado como inóculo tiene una alta actividad metanogénica (AME) y está adaptado a los sustratos presentes en el agua residual; en caso contrario, debe garantizarse la aclimatación al nuevo sustrato.

La procedencia del lodo determina sus características y dependiendo del tipo de proceso y de agua residual, se desarrollan condiciones ambientales favorables al desarrollo de poblaciones específicas de microorganismos para llevar a cabo un tratamiento eficiente del agua residual. De manera general, los lodos granulares son más eficientes que los floculentos debido a que presentan mejores características de sedimentabilidad, mayor AME y una mayor relación de sólidos volátiles (SV) a sólidos totales (ST) SV/ST.

La cantidad de inóculo empleado para el arranque de un reactor anaerobio tiene un efecto importante sobre el período de arranque y el tipo de gránulo formado. Una baja cantidad de inóculo retarda el arranque del reactor y un exceso puede ocasionar la expansión del lecho y lavado del lodo. Las cantidades recomendadas varían entre 10 y 20 kg de sólidos sedimentables volátiles (SSV) / m³ (Pérez *et al.*, 2006).

Sin embargo, los limitantes que se presentan y que se deben controlar rigurosamente para el adecuado funcionamiento de un digestor anaerobio son la temperatura y el pH, ya que como lo indica Álvarez *et al.*, (2012) la temperatura óptima para la digestión anaerobia puede encontrarse entre un rango entre 25 °C y 35 °C, mientras que los autores Quintero y Rondón (2012), Parra *et al.*, (2014) y Gerardi (2003) afirman que el pH del proceso de digestión anaerobia está limitando a un intervalo entre 6,8-7,2, acercándose a la neutralidad, dado que en este rango los microorganismos presentan un mejor crecimiento.

El proceso de oxidación anaerobia se puede simplificar mediante el siguiente esquema:

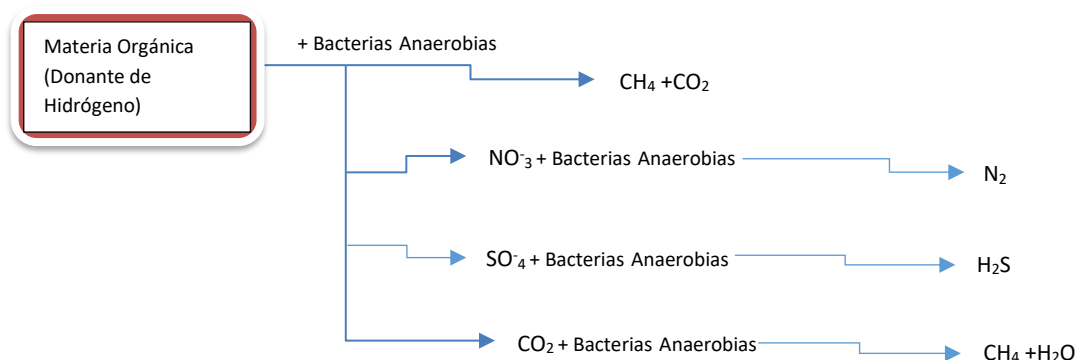


Figura 1. Esquema de Proceso de Oxidación Anaerobia. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales.

Los principales procesos de oxidación anaerobia, como se había mencionado anteriormente, según el autor Romero Rojas, pueden implicar:

- **Crecimiento microbiano suspendido**, donde el proceso de digestión se denomina de contacto y tiene como objetivo principal la remoción y/o estabilización de DBO.
- **Crecimiento híbrido**, donde se comparte el crecimiento microbiano como contacto, y como adherencia de la película microbiana sobre algún soporte físico. Los procesos pueden ser por **lagunas anaerobias** (que son unidades de tratamiento que soportan altas cargas contaminantes, pero con bajas eficiencias) las cuales tienen su uso principal se enfocado en la remoción de DBO y sólidos suspendidos (SS). **Proceso de flujo ascensional y manto de lodos anaerobio** (UASB en inglés o RAFA PAMLA en español) proceso en el cual el agua residual se introduce por el fondo de un reactor y se pone en contacto con un manto de lodos o gránulos biológicos de partículas de microorganismos, estos sistemas se utilizan para remover DBO y SS. Con este tipo de crecimiento se pueden clasificar también los procesos que usan **Tanques Imhoff** (utilizados para remover DBO, grasas y digerir SS) y los **Tanques Sépticos** (denominados también como fosas sépticas, utilizados como tratamientos primarios y para remover DBO, grasas y SS).

- **Crecimiento Adherido**, donde se agrupan los procesos de filtros anaerobios, procesos de lechos fluidizados y procesos de lecho expandido, que buscan remover y estabilizar DBO.

6.4 Uso de tanques sépticos y filtros anaerobios de flujo ascendente en el tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales domésticas

Los Tanques Sépticos, corresponden a los primeros sistemas anaerobios usados, constituyéndose en uno los sistemas más primitivos, que permiten retener y separar sólidos sedimentables del agua residual y muchas veces aprovechados para obtener biogás.

La característica principal de los tanques sépticos radica en que la sedimentación y la digestión del material orgánico ocurre dentro del mismo tanque. Los tanques sépticos se consideran digestores convencionales a escala muy reducida, su función principal es la hidrólisis de la materia orgánica en suspensión, estos sistemas también permiten eliminar sólidos suspendidos, material flotante, almacenar lodos y realizar tratamiento anaerobio sobre los lodos sedimentados, aunque las condiciones anaerobias estrictas no se cumplen y por lo cual es necesario complementar su tratamiento, mediante sistemas que ayuden a estabilizar los compuestos orgánicos y lograr buenas eficiencias de remoción. Este tipo de sistemas puede ofrecer remociones de DQO entre un 30 y un 50%, grasas y aceites entre un 70 a 80%, fósforo un 15 % y de un 50 a un 70% de Sólidos suspendidos (SS) (Chernicharo, 2013). Algunos datos bibliográficos señalan para el DBO eficiencias del 30% al 55% de DBO (Chernicharo, 2013); en general en cuanto a la eficiencia de remoción, los datos son variables y dependen de las condiciones locales de operación de la unidad.

Bajas eficiencias de las fosas sépticas se atribuyen al poco contacto entre la masa bacteriana y el material no sedimentable del afluente, por lo cual mucho del material hidrolizado no puede ser metabolizado por la población bacteriana y muchas veces termina siendo descargado del sistema. Generalmente los tanques sépticos se usan como acondicionadores o sistemas de tratamiento primario, que permitan posteriormente disponer las aguas de manera superficial y en lugares donde normalmente no existen sistemas de alcantarillado sanitario.

6.4.1 Los tanques sépticos como solución en el saneamiento rural

Los tanques sépticos son sistemas de tratamiento para las aguas residuales domésticas, provenientes de una vivienda o conjunto de viviendas que combina la separación y digestión de sólidos (OPS, 2003).

De acuerdo con el RAS (2000:2012), los tanques sépticos son generalmente diseñados y construidos para el saneamiento rural; se permitirá en áreas desprovistas de redes públicas de alcantarillado como alternativa de tratamiento de aguas residuales en áreas que cuentan con redes de alcantarillado locales y para la retención previa de los sólidos sedimentables, cuando la red de alcantarillado presenta diámetros reducidos.

Según la OPS (2003) los aspectos a tener en cuenta para el diseño de un tanque séptico son: tiempo de retención hidráulica del volumen de sedimentación, el cual no deberá ser menor a seis (6) horas, el volumen de sedimentación, el volumen de almacenamiento de lodos que se estima a partir de la producción de lodos y éste depende de la temperatura ambiental, el volumen de nata, y el espacio de seguridad.

Según Mukes y Kumar (2005), en un tanque séptico los sólidos se depositan en la parte inferior y las bacterias en las aguas residuales se alimentan de la materia orgánica, disolviendo los residuos.

Sin embargo, una de las desventajas o problemas que presentan los tanques sépticos, es que el efluente con frecuencia contiene numerosos virus, bacterias y protozoos patógenos, cantidades significativas de surfactantes como detergentes y residuos de jabón (Pang *et al.*, 2004).

Con el fin de atenuar el contenido orgánico de los nutrientes (Fosfatos-P, amonio-N) y de los patógenos en el efluente, una estrategia de tratamiento complementario es la descarga del efluente de los tanques sépticos a pozos de absorción o campos de drenaje donde el efluente es tratado adicionalmente por percolación a través del suelo; sin embargo estudios de

vigilancia recientes sugieren que esta práctica puede contribuir a la contaminación difusa y aumentar el riesgo de eutrofización (Withers *et al.*, 2012).

6.4.2 Componentes de un tanque séptico

Los sistemas de tanque séptico se integran con otros componentes como lo menciona (Cortés Pérez & Peña Villegas , 2004)

- **Trampa de Grasa:** se instala solo si se el agua residual recibe altas descargas de grasa, se coloca antes de la cámara séptica.
- **Compartimiento o cámara séptica:** en muchas ocasiones denominado el tanque séptico propiamente, es la unidad fundamental, allí se sedimentan los lodos y se estabiliza la materia orgánica por la acción bacteriana anaerobia. Su capacidad es calculada con base en el número de usuarios del sistema y el periodo de tiempo de recepción de aguas residuales al sistema.
- **Caja de distribución:** es un complemento externo y ayuda a distribuir el agua tratada o servida a los canales o ramales del campo de oxidación
- **Campo de Oxidación o Infiltración:** son fosos o canales abiertos que reciben las aguas servidas de las cajas de distribución, allí se consigue oxidarlas y eliminarlas por infiltración.
- **Fosa de Absorción:** complementan y/o sustituyen los campos de oxidación, allí el agua tratada se infiltra por el fondo y las paredes de excavaciones, que deben llevar grava para mejorar la distribución del agua.

Algunas condiciones que han de tenerse en cuenta para ubicar un tanque séptico son (Romero Rojas Jairo Alberto, 1999 pg. 233):

- Localizarlo a más de 15 metros de cualquier fuente de abastecimiento de agua.
- No debe estar expuesto a inundación y proporcionar espacio adicional para instalar sistemas de disposición o tratamiento complementarios.
- Los tanques sépticos deben tener acceso apropiado para su operación, mantenimiento y limpieza.

A continuación, se muestran dos modelos de tanques sépticos:

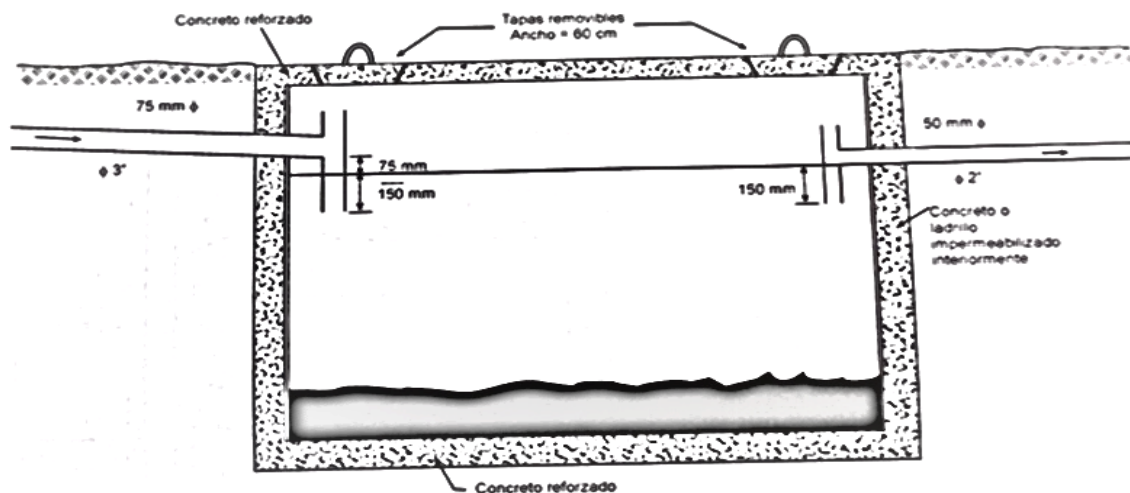


Figura 2. Tanque Séptico Domiciliar una sola Cámara. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.

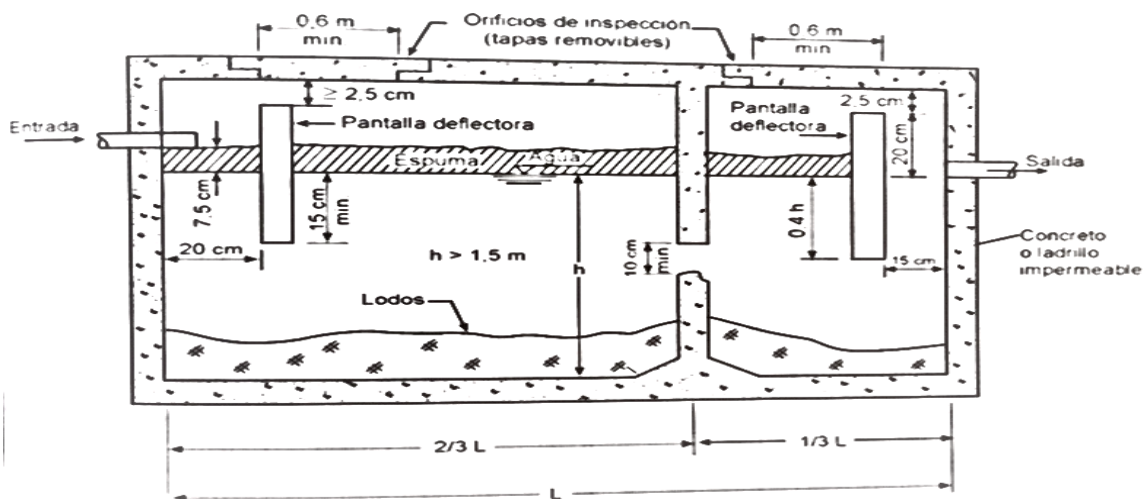


Figura 3. Tanque Séptico Típico. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.

6.4.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente

Fueron propuestos y desarrollados por Young y McCarthy entre 1968 y 1969 basándose en estudios de digestión anaerobia; la primera aplicación de este sistema se realizó en Brasil en 1970, difundándose luego en Canadá y USA. Es el más sencillo de los sistemas anaerobios

en cuanto su mantenimiento, ya que la biomasa se adhiere como una película (Ruiz Cortines, 2015) microbiana en el medio filtrante y por ser de flujo ascensional el riesgo de taponamiento es mínimo. Los (FAFA), conocidos como reactores anaerobios de segunda generación o avanzados, trabajan a alta tasa, trabajan bien para aguas con bajo contenido de sólidos y con DBO₅ bajas a intermedias es decir entre 1000 mg/L a 20000 mg/L. Pueden operar bien con tiempos de retención hidráulica TRH de horas y que tenga un sistema previo de tratamiento primario como un tanque séptico (Chernicharo, 2013).

Este tipo de filtros son una variación de los sistemas no convencionales, donde el proceso de crecimiento microbiano es de adherencia a un soporte sólido o medio filtrante.

Un filtro anaerobio está formado por un tanque o recipiente en forma de columna, relleno con algún soporte sólido que permita la adherencia y crecimiento biológico anaerobio.

El Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) es básicamente una unidad de contacto, en la que las aguas residuales pasan a través de una masa de sólidos biológicos que se encuentra contenida dentro de un reactor. Pueden tener varias formas, configuraciones y dimensiones, normalmente presentan forma cilíndrica o rectangular (Chernicharo, 2013). En el FAFA el flujo del líquido es ascendente, o sea, la entrada se da en la parte inferior del filtro hasta que los espacios vacíos son ocupados por el líquido y la salida en la parte superior; la carga de DBO aplicada por unidad de volumen es bastante alta, lo que garantiza las condiciones anaerobias y repercute en la reducción del volumen del reactor (Von Sperling, 2012).

El proceso FAFA, requiere de un tratamiento primario que elimine material suspendido del agua, con miras a evitar tempranas obstrucciones del filtro y que ésta siga caminos preferenciales. Por lo que el coeficiente de vacío del empaque deberá ser grande con suficiente área específica, debido a la desordenada distribución del soporte; procurar la acumulación lenta pero constante de biomasa para evitar una inadecuada purga de lodo. No se requiere de la incorporación de separadores de fases, ya que los sólidos suspendidos arrastrados por el biogás hacia la superficie son inmediatamente retenidos por el material filtrante (Pérez y Villegas, 2004).

El agua residual ingresa como afluente por la parte inferior del reactor y es puesta en contacto con la película de biomasa adherida al soporte, con lo que las bacterias son retenidas en el medio filtrante y no se pierden con el efluente cuya salida se encuentra localizada en la parte superior del tanque, esto permite obtener tiempos de retención celular altos (de hasta 100 días) (Romero Rojas Jairo Alberto, 1999 pg. 707), manejándose a la vez tiempos de retención hidráulica cortos e independientes de los tiempos de retención celular. Este proceso presenta pérdidas de energía hidráulica bajas, no se requiere recirculación ni suministro de calor y la producción de lodos o fangos es muy baja. Los filtros anaerobios pueden usar como medios de soporte anillos plásticos, guijarros o bioanillos; el medio biofiltrante siempre permanece sumergido en el agua residual y se prefieren temperaturas superiores a 25 °C para su mejor operación. Ha de mantenerse una alcalinidad suficiente en el residuo, generalmente del orden del 25% de la DQO, con el fin de mantener un pH adecuado en la zona de lodos normalmente mayor a 6,5. Algunas configuraciones particulares para estudios realizados en Brasil indican que usando lechos filtrantes de piedra de 4 a 7 mm de diámetro y alturas de 1,2 m removieron hasta un 80% de DBO, otros estudios mostraron remociones de DQO de hasta el 88% para afluentes con concentración de DQO iguales a 12 kg/m³, cargas volumétricas menores a 4Kg/m³d, tiempos de retención celular de 56 días y temperaturas entre 20 y 25 °C (Romero Rojas Jairo Alberto, 1999 pg. 707) (Cortés Pérez & Peña Villegas , 2004)

6.4.3.1 Componentes de un FAFA (Ruiz Cortines, 2015)

- **Zona de Alimentación (Sistema Hidráulico):** Corresponde a las tuberías ubicadas en el fondo del reactor, constituidas por tubos perforados (denominados flautas), dispuestas en un emparrillado o distribuidor y colocadas de tal forma que permiten la entrada del afluente por bombeo o gravedad. Este distribuidor se suele colocar a una distancia prudencial del fondo para evitar que los lodos y sedimentos se vayan depositando y obstruyan los orificios de distribución.
- **Zona de Digestión (Zona de empaque o medio filtrante):** Consistente en un compartimiento o tanque que puede ser cilíndrico o prismático (de sección rectangular) relleno con un material que tiene la capacidad de retener la mayor parte

de biomasa en su superficie, permitiendo biodegradar la materia orgánica presente en el agua residual. Este material de relleno o medio filtrante va muchas veces soportado sobre un emparrillado, que lo separa del fondo del tanque permitiendo una altura de agua libre. En este compartimiento la velocidad de ascenso del líquido debe ser lo suficientemente baja para evitar el arrastre de sustrato y microorganismos. El medio filtrante debe contar con ciertas características como el tamaño, la forma, la densidad, la porosidad, la composición, el material de soporte ha de ser estructuralmente fuerte para soportar su propio peso, ser biológica y químicamente inerte y como parámetro de diseño importante, poseer una razón de área superficial respecto al volumen bastante alta (la más común $100\text{m}^2/\text{m}^3$). El área del medio filtrante afecta además la velocidad del fluido, aumentándola al disminuir y viceversa. (Ruiz Cortines, 2015)

- **Zona de Sedimentación:** Corresponde a la zona superior después del medio filtrante y se busca en ella disminuir la velocidad de ascenso del agua para evitar el arrastre de partículas o flocs; varía según el tipo de agua a tratar, si la concentración de sólidos en suspensión es alta se pueden usar espacios pequeños, si por el contrario la concentración es diluida se requieren secciones más grandes. Es recomendable por ello al integrar un FAFA dentro de un reactor híbrido, conformarlo en dos secciones diferentes, siendo uniforme en su parte inferior y con expansión o ensanchamiento en la parte superior.
- **Zona de Recolección de Efluente:** Esta zona tiene como función captar el agua proveniente del sedimentador, para lo cual se utilizan canaletas perimetrales o centrales al sedimentador, aunque para filtros rectangulares se acostumbra a captar el efluente en un canal de salida. Se recomienda el uso de mamparas para crear un sello hidráulico y evitar la entrada de aire al digestor.
- **Zona Colector de Gas:** Consiste en una cubierta ubicada en la parte superior del filtro en forma de cono o campana y soldada contra la estructura de soporte del filtro y que tiene la finalidad de captar y dirigir el gas producido durante la biodigestión,

este puede ser recolectado a través de una mampara, la cual al igual que la campana de recolección, debe ser de materiales resistentes a la corrosión.

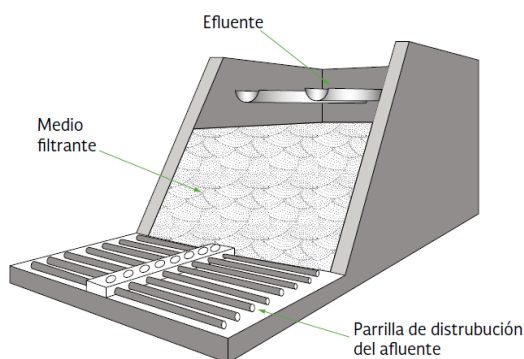


Figura 4. Detalle en Corte de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Fuente: Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento www.conagua.gob.mx

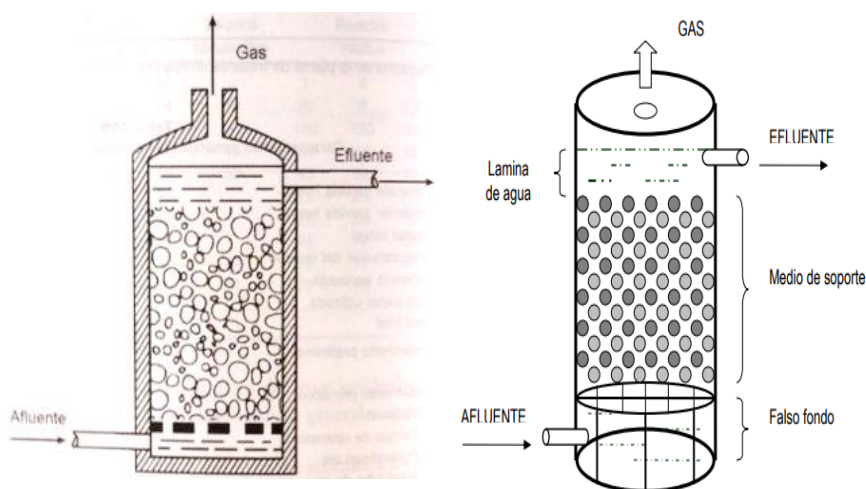


Figura 5. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.

6.4.3.2 Medios filtrantes

El medio filtrante es aquel material de relleno que se encuentra en el interior del reactor y que permite entre otros no solo la retención de pequeñas partículas de sólidos sino también el desarrollo de una biopelícula formada por microorganismos que crecen en los intersticios del material filtrante, son estos microorganismos los que se encargan de degradar parte de la materia orgánica.

Entre los tipos de medios más seleccionados se encuentran la piedra triturada angulosa o redonda (grava sin picos, de tamaño entre 4-7 cm), materiales cerámicos, vidrios, ladrillos, poliésteres, poliuretano, y otros más sofisticados como los anillos sintéticos, las matrices plásticas de flujo cruzado o tubular, igualmente se han implementado otros medios menos convencionales como la guadua, bambú, cáscara de coco y teja de barro (Castaño, 2003).

En Colombia se han desarrollado estudios utilizando diferentes medios de soporte como relleno en filtro anaerobio. Castaño y Paredes (2002) compararon el uso de anillos de guadua con el medio tradicional grava, resaltando los beneficios que se tienen al utilizar la guadua como material de empaque especialmente en términos económicos. Torres *et al.*, (2003) evaluaron tres medios de soporte (cáscara de coco, anillos de guadua y lecho mixto compuesto por residuos de ladrillera y cáscara de coco) en un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, dando como resultado que el medio que brindó las mejores condiciones operacionales y eficiencias de remoción de DQO y SST (70 y 90% respectivamente) fue la cáscara de coco, además de ser muy competitiva en precios y facilidad de acceso comparado con los otros medios evaluados.

La selección del material filtrante depende de aspectos como los costos, la porosidad, y la disponibilidad en el área donde se vaya a implementar el sistema. Según Torres *et al.*, (2003) las principales finalidades del medio de soporte son:

- Mejorar el contacto entre el sustrato y los sólidos biológicos contenidos en el reactor.
- Facilitar un flujo uniforme en el reactor.
- Permitir la acumulación de gran cantidad de biomasa.
- Actuar como una barrera física, evitando que los sólidos sean arrastrados por fuera del sistema de tratamiento.
- Actuar como un dispositivo para separar los sólidos de los gases.

6.5 Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos se entienden como aquellos que combina la presencia de biomasa en suspensión con biomasa adherida en el mismo reactor como ventajas de este tipo de sistemas

se observa que pueden llegar a ser muy convenientes en lugares donde no se cuente con una alta disponibilidad de terreno, o en plantas de tratamiento donde se desee aumentar la capacidad de los sistemas biológicos, sin realizar modificaciones sustanciales de la obra civil (Oyanedel *et al.*, 2003). Cabe mencionar que la configuración híbrida se ha empleado en instalaciones de FAFA, el cual consiste básicamente en dejar una zona carente de relleno por debajo del medio de soporte permitiendo la acumulación del lodo granular (Chernicharo, 2013).

A pesar de que el diseño de sistemas híbridos con tecnologías ya conocidas como TS, FA y UASB, ha venido cobrando relevancia para el tratamiento de aguas residuales en otros países, aún son pocas las experiencias respecto al tema. Por otro lado en Colombia los estudios y trabajos de este tipo son escasos debido a que estos sistemas son consideradas antiguos, sin embargo, esto no quiere decir que estén en desuso, actualmente siguen empleándose en la mayoría de las viviendas que no cuentan con servicio de alcantarillado, por lo que retomar dichas tecnologías y desarrollar investigación en torno a ellas con el fin de optimizarlas puede ser una alternativa viable y ajustada a las condiciones reales del país, el cual cuenta con una baja infraestructura en el área sanitaria.

6.5.1 Antecedentes de los Sistemas Híbridos

El diseño de sistemas de tratamiento de agua residual por metodologías anaerobias requiere del conocimiento de una serie de aspectos que son fundamentales como son consideraciones del alcance o cobertura de tratamiento, objetivos específicos de depuración, operatividad de los sistemas, facilidades de mantenimiento, relación con el entorno inmediato; además de la legislación que en tema ambiental le corresponda, incluso el diseño de sistemas completos, equipos y/o elementos para el tratamiento biológico de AR. En algunas ocasiones está fundamentalmente basado en consideraciones empíricas o experiencia recogida durante muchos años de trabajo (Pérez, Cortez, Yadira *et al.* *Tesis Diseño Teórico de un Reactor híbrido Mediante sistemas no convencionales para el Tratamiento de ARD. México 2004*).

La recopilación de estudios que se muestran a continuación tanto en escala de laboratorio, como piloto y real evidencian el desempeño de cada sistema, con diferente medio de soporte que son asociados a materiales encontrados en la zona donde se realiza el estudio. Sin embargo, no se encontraron estudios relacionando un híbrido como el propuesto en esta investigación.

Tabla 1. Resumen de investigaciones realizadas en Colombia de sistemas anaerobios.

Año	Autor	Región	Titulo	Agua	Tecnología	Escala	TRH	% Remoción DQO	Aspectos relevantes
2002	Castaño y Paredes	Pereira - Risaralda Vereda La Florida	Uso de aros de guadua en filtro anaerobios para el tratamiento de aguas residuales.	*ARD	Filtro anaerobio	Escala Piloto	4, 6, 8 y 12 h	-	El uso de aros de guadua como medio filtrante, en reemplazo de la piedra de mano, es viable técnica y económicamente. Las eficiencias de remoción de contaminantes son similares a las obtenidas por el medio tradicionalmente empleado en sistemas de flujo ascendente.
2003	Rodríguez et al	Mondomo - Cauca (Vereda La Agustina)	Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de yuca en filtro anaerobio: la influencia del medio de soporte	Aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca	Filtro anaerobio	Escala Real	15 h	70%	De los tres medios filtrantes evaluados, la cáscara de coco fue la mejor opción para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón agrio de yuca.
2005	Madera et al	Cali - Valle del Cauca (Corregimiento La Voragine)	Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales	ARD	Tanque Séptico (TS) + Filtro Anaerobio (FA) +	Escala Real	Se evaluaron los sistemas bajo diferentes caudales por ende diferentes TRH	84 - 77%	El sistema Integrado TS + FA + HFS, mostró ser una excelente combinación para la remoción de materia orgánica, y cumplió con la reglamentación colombiana
			Basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales		Humedal de Flujo Subsuperficial (HFS)				
		Ginebra - Valle del Cauca-	subsuperficiales		Tanque Séptico (TS) + Filtro Anaerobio (FA) +	Escala Piloto			
					Humedal de Flujo Subsuperficial (HFS)				

Año	Autor	Región	Título	Agua	Tecnología	Escala	TRH	% Remoción DQO	Aspectos relevantes
2005	Morillo y Fajardo	Manizales	Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la Esmeralda	Lixiviados rellenos sanitarios	Homogenizador + Reactores UASB	Escala real	24 H	92%	El lixiviado puro utilizado como afluente al sistema UASB es óptimo y no se requiere adición alguna de nutrientes siendo muy positivo por el bajo costo operacional requerido
2006	Castaño et al	Pereira - Risaralda Vereda La Florida	Tanque séptico (ST) - Filtro anaerobio de flujo ascendente - humedal construido Flujo - Subsurface system (SSF-CW) destinado a tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades en Colombia	ARD	Tanque Séptico (TS), Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS)	Escala Real	(En filtro anaerobio 8-4 horas) (24 horas para sistema completo)	81%	El conjunto TS-FAFA, bajo las condiciones de operación impuestas durante el estudio, no es apto para alcanzar remociones en carga superiores al 80% en aguas residuales domésticas diluidas.
2006	Chavarro et al	Pereira -Risaralda-	Evaluación de la tratabilidad de los lixiviados en el relleno sanitario de Pereira mediante filtros anaerobios de flujo ascendente a escala piloto	Lixiviados rellenos sanitarios	Filtro anaerobio	Escala Piloto	29 h	60 - 90%	Las eficiencias de remoción de DQO observadas en todas las líneas de tratamiento durante el periodo de estabilidad de los sistemas, muestran que éstos pueden operar con altas cargas aplicadas (entre 5 y 10 kgDQO/m ³) *d) y TRH bajos (1.16 días).
2009	Cárdenas y Ramos	Sandoná - Nariño	Evaluación de la eficiencia de reactores de lecho fijo utilizando aguas mieles residuales de trapiches artesanales	Aguas mieles de trapiche	Filtro anaerobio	Escala laboratorio	26 h	80%	El FAFA con concha marina como medio de soporte es la mejor opción como unidad principal para el tratamiento biológico de las aguas mieles residuales provenientes de trapiches artesanales, seguido del material sintético.
2009	Pérez et al	Mondomo - Cauca (Vereda La Agustina)	Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Optimización de variables ambientales y Operacionales	Aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca	Filtro anaerobio	Escala Real	10.6 h	77%	La evaluación del arranque y del desempeño del filtro anaerobio a escala real, evidencio la necesidad de acondicionar químicamente el agua residual. El índice Buffer se mostró como una herramienta fácil para el control del proceso

Año	Autor	Región	Título	Agua	Tecnología	Escala	TRH	% Remoción DQO	Aspectos relevantes
2013	Vargas y Martínez	Bogotá D.C.	Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en la Universidad Libre Sede Bosque Popular por medio del sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente UASB a escala piloto	ARD	Reactor anaerobio de flujo ascendente UASB	Escala Piloto	6.26 h	93%	El reactor anaerobio de flujo ascendente UASB, mostró recuperarse óptimamente después de sufrir una baja considerable en su rendimiento, ya que se alimentó con agua de infiltración indicando que el reactor responde positivamente a perturbaciones que alteran su funcionamiento.
2018	Salazar, Uribe Gómez y Zafra	Bucaramanga	Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales	ARD	Reactor anaerobio de flujo ascendente UASB	Escala Real	6.8 h - 8.9 h	80%	Se evidencia que los filtros anaerobios UASB no es la tecnología suficiente para el cumplimiento de los efluentes con la legislación colombiana, como lo demuestran los resultados de nitrógeno y fósforo, lo cuales necesitamos de una fase posterior de tratamiento para su reducción
2020	Giraldo et al	Yumbo - Valle del Cauca (Arroyohondo)	Propuesta de tratamiento para el agua residual generada en la empresa Soluciones Nutritivas	ARD	Lodos activados convencionales Filtro percolador Filtro Anaerobio Reactor UASB	Escala Real	NA	NA	Después de estudiar 4 tecnologías para el tratamiento de ARD, se selecciona el reactor UASB como la mejor alternativa para la empresa Soluciones Nutritivas ya que presenta mejores criterios de viabilidad, accesibilidad, flexibilidad, generación de olores y facilidad operacional.

Fuente: Adaptado de Arias, 2018.

Los sistemas o reactores híbridos que han sido construidos en América Latina, han sido principalmente desarrollados en Brasil y Colombia, consisten en un reactor integrado por un UASB o proceso de manto de lodos y un filtro anaerobio de flujo ascendente FAFA, son considerados como un sistema biológico en serie, teniendo excelentes resultados en la depuración de aguas residuales.

Como filtro anaerobio independiente, este reactor por sí solo presenta la desventaja del taponamiento u obstrucción del medio filtrante debido a la presencia de sólidos suspendidos y grasas en el agua residual de alimentación; por su parte el reactor UASB o de lecho de

fangos como sistema independiente, ha tenido un especial auge en el mercado y la inmovilización de microorganismos se consigue mediante la floculación de los lodos, pudiéndose usar tanto fango granular como floculentos. El reactor dispone en la parte superior de un separador gas-sólido favoreciendo el retorno de lodos, sin embargo, su inconveniente radica en que su funcionamiento depende en gran parte de la capacidad de sedimentación del fango (*del Campo Soroa S et Al, 2005, Tecnología del Agua, Diseño de Reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales*)

El reactor híbrido ha sido principalmente adecuado para el tratamiento de aguas residuales donde el desarrollo de lodos granulares es difícil, como los desechos de algunas industrias químicas (*Siti Roshayu Hassan et al, Development of Anaerobic Reactor for Industrial Wastewater Treatment 2013*); aunque también se ha utilizado con éxito en el tratamiento de diversos tipos de agua residual, como agua urbana (Elmitwalli, 2000) aguas de matadero, procesado de café, fábrica de refrescos, productos lácteos, lixiviado de vertedero, hasta agua de procesado de alimentos o azucarera (Batstone, 1999; Hawkes et al., 1995; Di Berardino et al., 1997; Guiot et al., 1984; Tur et al., 1997; Bello-Mendoza et al., 1998).

La experiencia proveniente de modelo híbrido que propone (Soroa del Campo S. 2005) corresponde a una instalación a escala piloto semi-industrial el cual tiene como objetivo principal el diseño y construcción de un reactor híbrido anaerobio, con el fin de analizar todas las variables de diseño y operación sujetas al cambio de escala. El reactor construido se utilizó a escala piloto, para el tratamiento de aguas residuales de matadero. La instalación estuvo conformada por varios procesos unitarios: un pozo de bombeo, un separador de sólidos, un tanque de flotación/sedimentación, un tanque de recirculación y el reactor híbrido biológico.

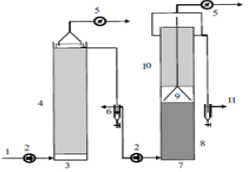
Existe una investigación en donde se muestra la combinación de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales (modelo híbrido) de tanque séptico y FAFA, siendo este el más cercano al diseño propuesto en este trabajo. El montaje de (Meena et al. 2005) corresponde a un sistema a escala de laboratorio que recibe agua residual doméstica en un tanque de alimentación con

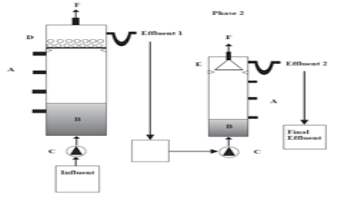
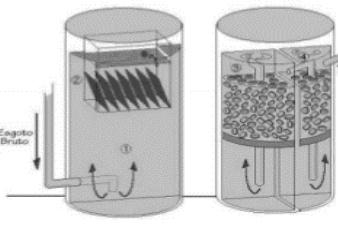
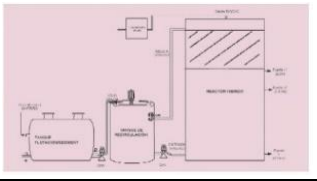
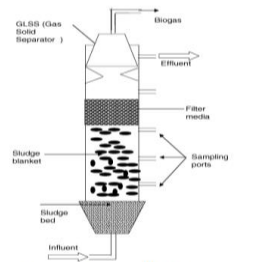
agitación y alimenta a su vez a unidad cilíndrica que integra internamente un tanque séptico con patrón de flujo ascendente y un FAFA. Los resultados de la puesta en marcha de este sistema híbrido fue la eliminación de carga contaminante en estado estable de forma eficientes alcanzando un % de remoción de $88,6 \pm 3,7$ % para la DQO, de $86,3 \pm 4,9$ % para la DBO y de $91,2 \pm 9,7$ % para los SST. El análisis microbiano mostro también una reducción superior al 90% para organismos indicadores patógenos.

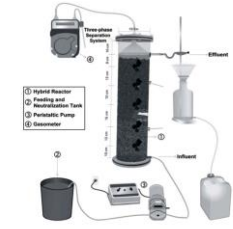
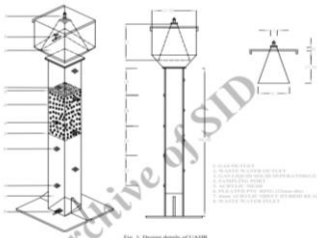
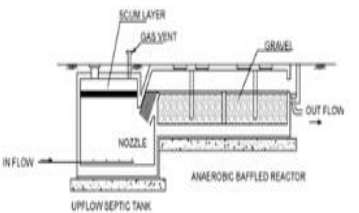
El estudio más reciente de sistemas híbridos se llevó a cabo en Nepal por (Adhikari y Lohani. 2019) donde se diseñó un sistema combinado de tanque séptico – UASB y se comparó contra uno convencional (tanque séptico como tratamiento primario y UASB como secundario) y se comprobó que el sistema híbrido presentaba un correcto funcionamiento con eficiencias de remoción del 88% contra un 65% para el sistema convencional.

En la siguiente tabla se presenta un resumen sobre algunos de los sistemas híbridos que se han investigado a nivel internacional (tabla 2).

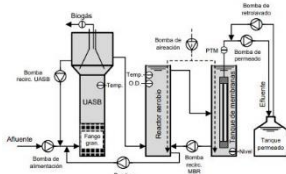
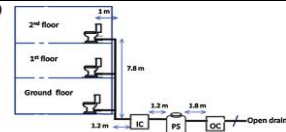
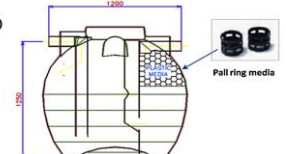
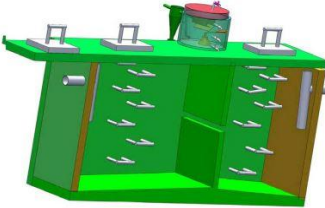
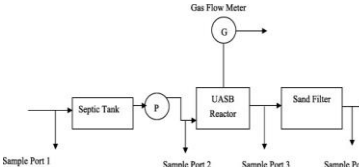
Tabla 2. Estudio de sistemas híbridos en reactores anaerobios.

Año	Autor	País	Tipo de Agua	Tecnología	Escala	TRH	DQO en el afluente	% Remoción DQO	Esquema del sistema/ observaciones
2002	Elmitwalli et al	Países bajos	ARD de una villa	Sistema en dos pasos Filtro Anaerobio + Filtro Híbrido (AF+HF)	Escala Real: Diámetro de ambos reactores 0,19 m y alturas de AF y AH de 2.1 y 2.3 m, respectivamente.	4h + 8 h	-	71%	

Año	Autor	País	Tipo de Agua	Tecnología	Escala	TRH	DQO en el afluente	% Remoción DQO	Esquema del sistema/ observaciones
2005	Sousa & Chernicharo	Brasil	ARD domiciliarias	Tanque Séptico modificado y dos reactores anaerobios híbridos operando en serie	Escala Real: Altura útil 1,40 y 1,90 m. Altura del compartimento con medio de soporte 0,5 y 1,00m	24 h	123 - 203 mgDQO/L	90%-85%	
2005	Luostarinen & Rintala	Finlandia	Sintética simulando aguas residuales negras (Lodos primarios y papel higiénico)	Híbridos tanque séptico - UASB	Laboratorio	4.4 d + 1.4 d	0.301 kg DQO/m ³ ·d	90%	
			Tambo (efluente granja lechera)			3.5 d+1.5 d	0.191 kg DQO/m ³ ·d	80%	
2005	Soroa del campo, Lopetegui Garnika, Almandoz Peraita & García de las Heras	España	ARI - matadero	Sistema híbrido: UASB en la parte inferior seguido de un filtro anaerobio en la parte superior	Escala piloto	23 h	5 Kg DQO/m ³	97%	
2006	Anushyaa Ramakrishnan, S.K. Gupta	India	Aguas Residuales de carbón sintético	UASB-Filtro Anaeróbico superior	Escala de banco de prueba: 4 Reactores con volumen total efectivo de 13,5 L. Dimensiones interiores 0,1 m x 0,1 m y longitud de 1,5 m. Construido en acrílico transparente de 6 mm de espesor	24 h	2240 mg/L	88%	 <small>Fig. 1. Schematic diagram of the hybrid UASB reactor.</small>

Año	Autor	País	Tipo de Agua	Tecnología	Escala	TRH	DQO en el afluente	% Remoción DQO	Esquema del sistema/ observaciones
2008	Araujo, Rocha, Cammarota, Xavier & Cardoso.	Brasil	ARI cosméticos	UASB - Biofiltro	Escala piloto	40h, 50h y 60h	1000 - 5000 mg DQO/L	77%	<p>NOTA: Material de soporte utilizado cáscara de coco.</p>  <p>Figure 1: Schematic drawing of the experimental hybrid (UASB + biofilter) reactor.</p>
2009	M.selvamurugan et al	India	Aguas residuales del proceso del café	Reactor Hibrido anaeróbico de flujo ascendente	Laboratorio	6 h, 12 h, 18 h y 24 h	6420-8480 mg/L DQO; (carga Orgánica DQO: 9,55 Kg/m ³ /día)	61%	 <p>Fig. 1. Design details of UASBR</p>
2010	Sabry, T.	Egipto	ARD de una villa	Tanque Séptico -Reactor anaerobio con baffles (USBR)	<p>Escala Real:</p> <p>ancho x longitud x profundidad de 2.1 × 4.2 × 2 m</p>	20 h	-	84%	 <p>Fig. 1. Cross-sectional view in the modified septic tank system (USBR).</p>

Año	Autor	País	Tipo de Agua	Tecnología	Escala	TRH	DQO en el afluente	% Remoción DQO	Esquema del sistema/ observaciones
2012	Guardia et al	España	ARI - despulpe de café	2 reactores: R1 - UASB R2 - 2PUASB (reactor de dos fases R. Acidogénico + R. Metanogénico)	Escala de laboratorio	22.5 h	2.6 Kg/m ³ día	60%	
2013	Da Silva et al	Brasil	ARD	36 tanques Séptico + Filtro Anaerobio	Escala real para población 150000 hab apróx	2,16 días	0,37 kg DQO/m ³ .	39%	<p>Observación: Se evaluó el desempeño de dos configuraciones: Tanque Séptico + Filtro anaerobio (TS+FA) y El Reactor UASB. El rendimiento de las plantas UASB fue superior, porque se ha descuidado el mantenimiento en plantas TS+ FA, por el creciente interés en UASB</p>
				20 UASB		0,47 días	1,70 kg DQO/m ³ . d	59%	
2014	Meena, Anwar & Absar	India	ARD	Híbrido: Tanque séptico y filtro anaerobio en una sola unidad	Escala de laboratorio	24 h	411.4 Kg DQO/L	88,6 %	
2015	Sánchez et al	Costa Rica	ARI - quesera	2 reactores: R1 50% RAFA - 50% FAFA R2 40% Rafa - 60% FAFA	Escala de laboratorio	3.5 días	2000 mg DQO/L	65% para R1 41% para R2	

Año	Autor	País	Tipo de Agua	Tecnología	Escala	TRH	DQO en el afluente	% Remoción DQO	Esquema del sistema/ observaciones
2015	Mendes et al	España	Agua Residual Sintética	Sistema combinado: Reactor UASB + MBR (Reactor aerobio y tanque de membrana)	Escala de laboratorio	30 h - 40 h	900 - 1300 mg DQO/L	75%	
2016	Sharma et al	India	ARD	Sistema en dos pasos: tanque séptico modificado seguido de FAFA dentro de una unidad	Escala Real	50 h	1352 mg DQO/L	72,6% DQO	(a) 
							993 mg SST/L	83,2% SST	(b) 
2019	Adhikari & Lohani	Nepal Katmandú	ARD	Tanque séptico seguido de un UASB	Escala piloto	2 h - 24 h	600 mg DQO/L	88 % DQO 83 % SST	
2020	Sunil, Sanjay & Rune	Nepal	ARD	Tanque séptico seguido de Reactor UASB y seguido de filtro de arena	Escala piloto	6 H	144 mg DQO/L 53 mg SST/L	93% DQO 87% SST	

A pesar de que se realicen tantos estudios sobre tecnologías de TS y FA en Colombia, los sistemas convencionales siguen operando en la mayoría de las viviendas que no cuentan con servicio de alcantarillado y no se conocen estudios de sistemas híbridos. Por su parte analizando experiencias de este tipo de investigaciones a nivel internacional se evidencia el buen desempeño que estas presentan, lo que hace importante que a nivel nacional se busque nuevas tecnologías que logren encontrar una baja infraestructura en el área sanitaria.

6.5.1.1 Factores que influyen en el diseño de un sistema híbrido tanque séptico-fafa

En general se podrían dividir en tres categorías los factores que afectan el desempeño de los reactores anaerobios en el tratamiento de aguas residuales y que a su vez son los factores que se deberían tener en cuenta para diseñar este tipo de sistemas a gran escala.

Las categorías para considerar de factores serían:

- Factores físicos: Configuración del reactor, tipo de medio y su disposición.
- Factores de desempeño: Características del agua residual y factores biológicos
- Factores hidráulicos: Reciclo del efluente

Las configuraciones a gran escala de los filtros anaerobios pueden ir desde formas cilíndricas hasta rectangulares, diámetros o anchos de 6 a 26 m, alturas de 3 m a 13 m y volúmenes entre los 100 y 10000 m³, los medios de soporte pueden cubrir toda la profundidad del filtro u oscilar entre el 50 y 70% de la altura del reactor. Los soportes o medios filtrantes pueden ser rellenos sueltos o bloques modulares de láminas de plástico corrugado, tubulares para ayudar a direccionar el flujo, o de disposición que permitan el flujo cruzado o anillos. No hay una tendencia en la preferencia de medios utilizados y esta decisión está relacionada más con razones comerciales, si bien los estudios a escala de laboratorio y a gran escala muestran menores eficiencias en los medios de relleno sueltos y tubulares que los medios de flujo cruzado (Yang, Jahan, and Young, 1987; Jahan 1987).

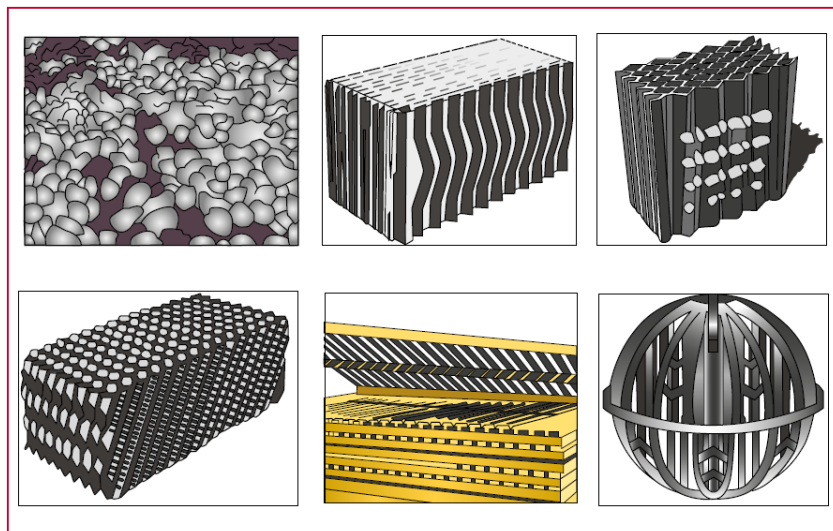


Figura 6. Medios de Soporte o de relleno para filtración en reactores anaerobios. Fuente: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente, pág. 5. (Ruiz Cortines, 2015)

El propósito del medio es retener la masa biológica y ayudar a favorecer y mejorar el contacto entre esta y el sustrato presente en las aguas residuales, permitiendo una gran acumulación de biomas y largos tiempos de retención.

Los sistemas anaerobios que utilizan reactores híbridos con una zona desempaquetada debajo del medio filtrante permiten el crecimiento de lodo granular o lodo suspendido. La cantidad de medio soporte en los reactores híbridos es subjetiva, pero se recomienda que el medio de soporte se coloque en los 2/3 superiores de la altura del filtro y una altura del soporte no inferior a 2 m. La superficie específica de los medios filtrantes parecen tener un efecto menor en la eficiencia de remoción presentando mejoras de menos del 5% de eliminación de DQO para aumentos del doble de la superficie específica (*Song, 1985 Song and Young 1986*) para áreas de superficie específica de aproximadamente $100\text{m}^2/\text{m}^3$ no se presentan taponamientos en rellenos modulares o tubulares de flujo cruzado (*tablas 1 y 2 . Young James C. factors affecting the design and performance of up flow anaerobic filters, wat. Sci.tech Vol4 .1991*)

Aunque las pruebas a escala de laboratorio y a nivel piloto ayudan determinar relaciones específicas entre factores de diseño y operativos como configuración del reactor, tipo de colocación del medio filtrante, carga orgánica y TRH, no se ha desarrollado una relación de

rendimiento integral y ampliamente aceptada para el diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente a gran escala. Algunos investigadores (Yang, Jahan, and Young, 1987; Jahan 1987) usaron métodos estadísticos mediante correlaciones lineales multivariantes entre los parámetros mencionados y la eficiencia E, para aislar los parámetros que hacen el mayor aporte al coeficiente de correlación R^2 del modelo.

Las siguientes ecuaciones de correlación de eficiencia y parámetros de diseño y operativos fueron propuestas y estudiadas para medios de filtración sueltos y modulares fijos, donde K está asociado con el coeficiente cinético del sistema:

$$E = K (TRH)^a (S_o)^b (A_s)^c \quad \text{y} \quad E = K (TRH)^a (S_o)^b (A_s)^c (C_s)^d \quad \text{Ec 1 y 2}$$

(tablas 3 y 4. Young James C. factors affecting the design and performance of up flow anaerobic filters, wat. Sci.tech Vol4 .1991)

Estas correlaciones establecen la relación entre la eficiencia E, los parámetros tiempo de retención (TRH), concentración de sustrato en el afluente (S_o), área superficial específica (A_s) y pendiente de los canales de los medios de filtración modular (C_s), con los valores de los exponentes a, b, c, d respectivamente.

La investigación mostró que el TRH era el único parámetro que afectaba significativamente la eficiencia y que esta cambiaría entre un 12 y 17 % al duplicar el parámetro TRH.

La adición de la concentración del afluente S_o al modelo no aumentó el coeficiente de correlación apreciablemente duplicando S_o y manteniendo TRH estable, sólo cambio la eficiencia de remoción entre 5 y 6 %; las pruebas en las que se varió el parámetro del área de superficie específica A_s , no contribuyó tampoco con una mejoría importante en el coeficiente de correlación y así, el efecto de duplicar A_s varió en la mayoría de datos solo 4,5% a favor de la eficiencia. Agregar el factor de pendiente de los canales C_s si mejoró en gran medida la correlación (tablas 4. Young James C. factors affecting the design and performance of up

flow anaerobic filters, wat. Sci.tech Vol4 .1991) probablemente reflejando la retención mejorada de sólidos en el medio filtrante con la disminución de la pendiente.

Un análisis estadístico similar se repitió utilizando la carga orgánica L_a , en lugar del TRH, donde la carga orgánica relaciona la concentración del sustrato del afluente S_o con el TRH mediante $L_a = S_o / \text{TRH}$.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones de correlación:

$$E = K (L_a)^{a'} (S_o)^{b'} (A_s)^{c'} \quad \text{y} \quad E = K (L_a)^{a'} (S_o)^{b'} (A_s)^{c'} (C_s)^{d'} \quad \text{Ec 3 y 4}$$

(tablas 5 y 6. Young James C. factors affecting the design and performance of up flow anaerobic filters, wat.Sci.tech Vol4 .1991)

Usando sólo la tasa de carga orgánica como parámetro, los coeficientes de correlación fueron muy bajos, sin embargo, los coeficientes de correlación aumentaron notablemente cuando se agregó la concentración de DQO (S_o del afluente), pero cuando se duplicó la carga L manteniendo constante S_o , la eficiencia de remoción disminuyó entre el 8% y 15% lo cual era de esperarse puesto que esencialmente era equivalente a disminuir el TRH en un factor de dos.

Por su parte para este mismo grupo de análisis, la adición del área superficial específica (A_s) al parámetro L de la ecuación de correlación, no mejoró la correlación, sin embargo, duplicando el A_s se debería predecir un cambio en eficiencia entre -18% y 4%.

Así también, como cuando se usó el

TRH como parámetro básico en la correlación, esta también mejoró significativamente cuando se incluyó a C_s de la pendiente del medio filtrante (flujo cruzado) junto a la carga (L), pero ello no cambió la relación ya encontrada entre S_o y A_s (es decir continuo sin mejoría la Eficiencia al adicionar a la ecuación el parámetro A_s manteniendo S_o constante).

Estudios realizados por algunos autores entre 1965 y 1968 y confirmados luego por Oh Yang en (1986) y Young - Yang (1989) dedujeron la siguiente expresión.

$$E = 100 (1 - S_k(TRH)^{-m}), \text{ Ec 5.}$$

donde **S_k** y **m** son coeficientes que depende del sistema y medio filtrante respectivamente.

Para esta expresión, Yang encontró que el parámetro más importante era el TRH para describir el desempeño de filtros anaerobios FAFA, con medios o rellenos flotantes y posteriormente hallando que esta relación podía ser usada para describir tratamientos con filtros anaerobios a escala piloto y gran escala y para variadas condiciones de aguas residuales y de condiciones de campo.

Los coeficientes que mejor describen los datos a escala de laboratorio y escala completa usando un A_s de $98 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para medios filtrantes de flujo cruzado, son $S_k=1,0$ y $m=0,55$

Se debe ser cuidadoso al usar las relaciones anteriores para dimensionar reactores a escala completa, aunque proporcionan estimaciones razonablemente buenas del rendimiento o eficiencia para reactores de laboratorio y de escala completa que contienen medios o lechos de filtración modulares de flujo cruzado con una A_s de aproximadamente $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$, pero teniendo en cuenta que no se conocen los límites de estas relaciones.

La relación dada por la ecuación 5 ha de ser lo suficientemente precisa como para proporcionar un tamaño de filtro (en primera instancia) y minimizar el número ensayos en configuraciones para estudios de reactores a nivel piloto (Song, 1985 Song and Young 1986, pag 146).

Variables de tipo hidráulicas como el reciclo en el efluente solo causan una pequeña mejora en la eficiencia de remoción que para el caso o de la DQO, puede ser del alrededor del 4% según los autores de los presentes estudios. En relación con factores como las velocidades de ascenso y en ausencia de valores definitivos de pruebas piloto, se recomiendan valores

inferiores de 10 m/d durante las fases de arranque de los FAFA para mantener las tasas de reciclo y las cargas de desechos ajustadas, además velocidades superiores a 25m/d pueden causar pérdida excesiva de sólidos.

Para los factores biológicos es indispensable mantener una acumulación de sólidos biológicos activos en los filtros anaerobios FAFA, de tal manera que haya concentraciones suficientes para una buena eficiencia de tratamiento y manteniendo SRT (tiempo de retención de sólidos) largos para permitir la máxima descomposición de sólidos, lo anterior se lograría por ejemplo, para el caso de aguas con residuos de ácidos orgánicos con un DQO afluente de 3000 mg/L manteniendo menos de 30 mg/L en la concentración del efluente para lograr SRT de 100 días.

Como conclusiones y de acuerdo con los estudios de Young con pruebas realizadas a escala de laboratorio y con plantas a gran escala operadas con una variedad de condiciones, se ha identificado el TRH como el parámetro de diseño y rendimiento más importante para reactores anaerobios de flujo ascendente. Otros parámetros, como la altura del reactor y la concentración del afluente (excepto, al parecer, para concentraciones por debajo de 2000 mg DQO/L) no tienen esencialmente ningún efecto cuando se opera con tiempos de retención hidráulicos definidos. La carga orgánica volumétrica debería ser menor a 12KgDQO/m³d. Se recomiendan al menos 2 m de altura de medio filtrante. Factores como el área superficial específica de los lechos o medios filtrantes y su orientación parecen tener un efecto menor en el desempeño y el beneficio en el rendimiento, el cual no es sustancialmente significativo como para aumentar el parámetro de área superficial más allá de 100m²/m³. Por su parte el reciclaje de efluentes proporciona una pequeña mejora en la eficiencia, pero sobre todo puede resultar beneficioso para reducir la necesidad de adecuación de pH a través de productos químicos.

Los filtros anaeróbicos y otros reactores de película fija generalmente han funcionado de manera satisfactoria cuando se opera a 25 a 38 °C en el rango mesofílico, también factores como el pH y las concentraciones de nutrientes deben ser adecuadas para el crecimiento anaeróbico; los compuestos tóxicos o inhibidores deben excluirse del reactor o deben

incluirse algunos medios para neutralizar los efectos inhibidores. Los sistemas de ingreso deben permitir una homogénea distribución del afluente utilizando flautas similares a las mostradas en la figura 3 con orificios espaciados a menos de 1 m de separación entre sí. Deben existir drenaje(s) de lodos con tubería(s) de diámetros de al menos 5 cm y espaciados de ser necesario a no menos de 3 m en línea vertical.

La revisión anterior de factores y variables que afectan el diseño de sistemas de tratamiento anaerobio de flujo ascendente son las consideraciones generalizadas producto de años de investigación y como lo explican los autores, obedecen a experimentaciones a nivel piloto de laboratorio y a gran escala. Sin embargo, los estudios particulares pueden requerir ajustes y variaciones de acuerdo con las necesidades concretas de trabajo y/o de investigación.

6.5.1.2 Características típicas del agua residual doméstica

En la tabla 3 se muestra una tabla con el resumen de algunos parámetros típicos en aguas residuales domésticas. Estos valores se pueden tomar como referentes al considerar las variables para el diseño de un sistema de remoción.

Tabla 3. Composición agua residual

COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	
Parámetros	Magnitud mg/L
Sólidos Totales	720
Sólidos Disueltos	500
Sólidos Disueltos Volátiles	200
Sólidos Suspendidos	220
Sólidos Suspendidos Volátiles	165
Sólidos Sedimentables	10
DBO	220
COT	160
DQO	500
Nitrogeno Total	40
Fósforo Total	8
Cloruros	50
Alcalinidad	100
Grasas	100

Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Segunda Edición 2002.

6.5.1.3 Parámetros de calidad límites para vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas provenientes de entidades de servicios. Resolución 0631 de 2015.

Dentro de los aspectos de diseño y atendiendo a los objetivos específicos de depuración la legislación ambiental colombiana, se estableció la resolución 0631 de 2015 por la cual se dictaminan los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público para actividades industriales comerciales y de servicios, estos valores entre otros factores servirán también de referencia, para hacer seguimiento y revisión durante el diseño del reactor híbrido como parte de la propuesta del trabajo de la presente investigación.

Se presenta a continuación, la tabla con los valores máximos o límites permisibles para descargas a cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado para actividades de entidades de servicios (*Art 8. Res 0631 de 2015*).

Tabla 4. Valores Máximos o Límites Permisibles, Para Descargas a Cuerpos de Agua y Sistemas de Alcantarillado

VARIABLE	UNIDADES	VAOR PERMISIBLE
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	180
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)		90
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5
Grasas y Aceites	mg/L	20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)		Reportar
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Reportar
Compuestos de Fósforo		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Reportar
Fósforo Total (P)	mg/L	Reportar
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Reportar
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Reportar
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Reportar
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Reportar

Fuente: Resolución 0631 Marzo 17 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

7 METODOLOGIA

7.1 Definiciones

Tratamientos: Corresponden a los efectos de la configuración, de TRH o su combinación, que se estudiaron sobre el agua residual doméstica.

Unidades Experimentales: Unidades físicas donde se aplicaron los tratamientos o combinación de tratamientos (para nuestro caso corresponde a las configuraciones que también son susceptibles de estudio comparativo)

Unidades de Tratamiento: Son los bloques o cantidades de agua residual doméstica definida que ingresan para ser tratadas en una unidad de configuración particular (unidad experimental) y con un caudal específico y que son susceptibles también de variación.

Unidades de Muestreo: Unidades o material escogido (porciones de agua residual) del cual se obtienen las muestras para ser medidas (medición de las variables repuesta).

ANOVA: Metodología estadística denominada análisis de varianza que permite la comparación de diversos valores promedio que son producto de la experimentación de un fenómeno donde actúan por los menos dos factores distintos o un factor dividido en al menos dos niveles de variación, sean estos factores cualitativos o cuantitativos.

7.2 Descripción del experimento

Las unidades experimentales fueron implementadas a escala piloto y se ubicaron en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales. La alimentación de los sistemas de tratamiento se realizó con agua residual doméstica proveniente de dicha planta, a través de una red de distribución hecha con tubos de PVC y mangueras.

El sistema híbrido se construyó en fibra de vidrio e integró en una sola unidad un tanque séptico (TS) en la parte inferior y en la parte superior un filtro anaerobio (FAFA), construido en fibra de vidrio con un volumen de 938 litros y unas dimensiones de 1.90 metros de altura, por 0.7 metros de ancho, por 0.7 metros de largo. El sistema convencional correspondió a un sistema prefabricado que consta de un tanque séptico (TS) de 500 L y un filtro anaerobio

(FAFA) de 250 mL en unidades independientes, las cuales fueron conectadas en serie. Cabe resaltar que se llevó a cabo la construcción de dos unidades de tratamiento por cada sistema propuesto en este proyecto, es decir, se implementaron dos sistemas híbridos y dos sistemas convencionales con las mismas condiciones (medidas, medio filtrante, inóculo, carga orgánica) con el fin de obtener resultados comparables entre sí que permitan conseguir un mejor análisis estadístico de los datos.

7.3 Tipo de Medio Filtrante Usado

Se utilizó como material de relleno tanto para el filtro anaerobio convencional como para el sistema híbrido, rosetones de tipo plástico en polipropileno de 186 mm de diámetro, con una porosidad del 95% los cuales gracias a su baja densidad permiten un sistema más liviano. Con el fin de mejorar la distribución de agua residual en los reactores, se instaló tanto en el fondo de los Filtros Anaerobios Convencionales, como de los sistemas híbridos, tubería de PVC de 1 pulgada con perforaciones de 0,5 mm (ver figura 7)



Figura 7. Flauta de distribución y medio filtrante

La Figura 8 muestra el esquema de las dos configuraciones o sistemas de tratamiento que se estudiaron durante esta investigación.

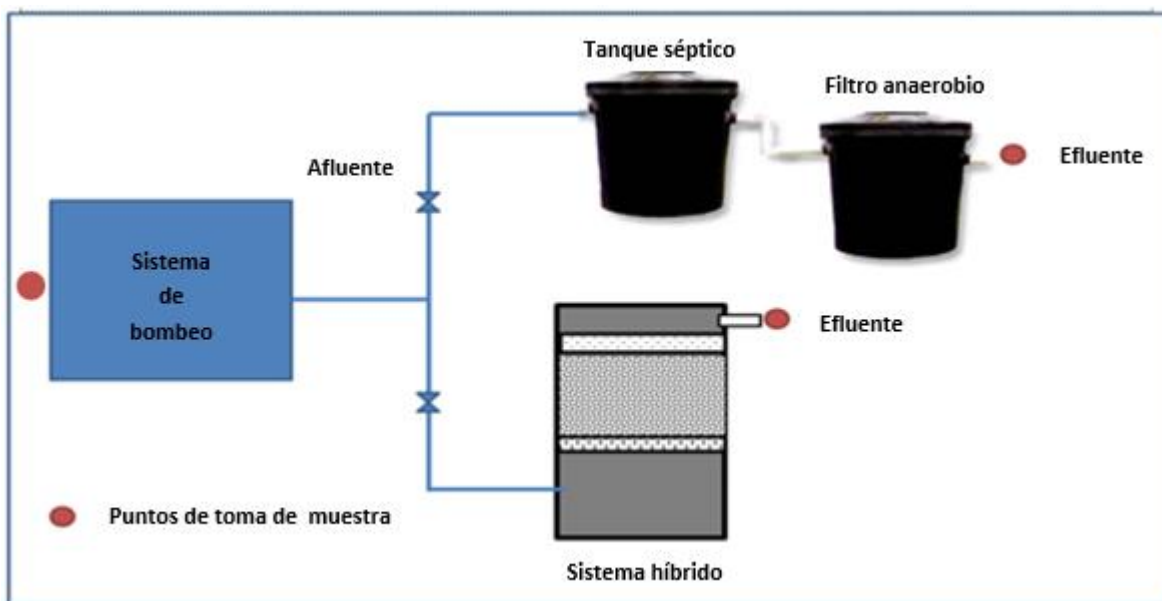


Figura 8. Esquema de los sistemas de tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

7.4 Arranque y operación de los sistemas

Los sistemas arrancaron simultáneamente y fueron inoculados con lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UTP. La inoculación se hizo adicionando el lodo en una proporción aproximada al 40% del volumen útil de acuerdo con lo recomendado por Torres et al., (2009), y se inició la alimentación de los reactores mediante un sistema de distribución de mangueras y se reguló la carga hidráulica con bombas peristálticas.

El periodo de arranque fue variable y dependiente de la respuesta de cada sistema en términos del desempeño expresado como las eficiencias de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos totales. Una vez que dichas remociones fueron constantes los sistemas se encontraron en condiciones estables, se dio fin a la etapa de arranque e inmediatamente se pudo iniciar la fase de operación.



Figura 9. Inoculación de los sistemas convencionales e híbridos

Las muestras objeto de estudio fueron recolectadas una vez por semana en recipientes de vidrio ámbar y plástico (dependiendo del parámetro a evaluar) para su transporte y conservación hasta su posterior análisis. Los parámetros que se determinaron en dichas muestras fueron DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), alcalinidad, ácidos grasos volátiles y ocasionalmente se midió nitrógeno total, nitritos y nitratos. Cabe resaltar que los parámetros fisicoquímicos como la temperatura, pH, conductividad eléctrica y caudal fueron medidos en campo inmediatamente se llevó a cabo la toma de muestras.

Las muestras fueron tomadas a la entrada de la red de distribución del agua residual de alimentación de los reactores (afluente) y a la salida de cada sistema híbrido y de cada sistema convencional (efluentes) como se destaca a través de los puntos rojos mostrados en la Figura10.

Los análisis de las muestras se llevaron a cabo en el laboratorio de Procesos Biológicos de la Facultad de Ciencias Ambientales de la UTP teniendo en cuenta los procedimientos del Standard Methods (2005).

7.4.1 Programa de monitoreo

Las configuraciones se evaluaron con 4 caudales, el primero de 0,0054 L/s, el segundo de 0,0065 L/s, el tercero de 0,0081 L/s y el último de 0,0108 L/s. En este sentido el monitoreo se dividió en cuatro fases variando el caudal en cada una de estas y se realizó la toma de muestras una vez por semana durante seis meses para observar los cambios entre cada fase evaluada. En la Tabla 5 se detalla el plan de trabajo.

Tabla 5. Programa de Monitoreo.

Parámetro	Método	Frecuencia toma de muestras (por semana)	Afluente	N° de muestras sistemas convencionales	N° de muestras sistemas híbridos	Total muestras por semana	Período de monitoreo (semanas)
DQO (mg O2/L)	Reflujo cerrado, titulométrico	1	1	2	2	5	24
DBO5 (mg O2/L)	Respirométrico						
SST (mg/L)	Gravimétrico						
Alcalinidad (mg/L)	Titulométrico						
Acidos grasos volátiles (mg CH3COOH/L)	Titulométrico						
Nitrógeno total (mg/L)	Fotométrico						
Nitritos (mg/L)	Fotométrico						
Nitratos (mg/L)	Fotométrico						
pH	pH-metro						
Temperatura (°C)	Termómetro						
Conductividad eléctrica (µs/cm)	Conductímetro						
Caudal (L/s)	Volumétrico						
TOTAL MUESTRAS DURANTE EL PROYECTO							120

Fuente propia

7.5 Diseño experimental

Se propuso para la presente investigación un diseño factorial en el que los niveles de los factores considerados en la experimentación fueron lo siguientes:

- Para el tipo de Reactor o Configuraciones: TF1, TF2, SH1 y SH2 (Tanque séptico –Filtro anaerobio y Sistema Híbrido; **construidos por duplicado**)
- De acuerdo con (Young, 1991), para filtros anaerobios el TRH es el parámetro que más influencia tiene sobre la eficiencia de remoción de la DQO. Considerando que tanto los

sistemas convencionales como híbridos cuentan con este componente, la revisión de literatura sobre el TRH en Filtros anaerobios concluyó que cuando estos sistemas son empleados para el pulimento de los efluentes de tanque séptico, producen efluentes aceptables bajo TRH del orden de 4 – 10 horas (Chernicharo,2013). También menciona que para efectos de diseño, es necesario realizar los cálculos con caudales pico, los cuales se pueden estimar como 4 veces el promedio ((Romero Rojas Jairo Alberto, 1999 pg. 682). Por lo cual este será el criterio usado para los cálculos de diseño.

- Teniendo en cuenta la información bibliográfica anterior y sabiendo que los valores a tratar son inferior a los valores picos de diseño, se operaron Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) medidos en horas de 18 h, 24 h, 30 h, 36h. En la siguiente figura se esquematiza el diseño factorial:

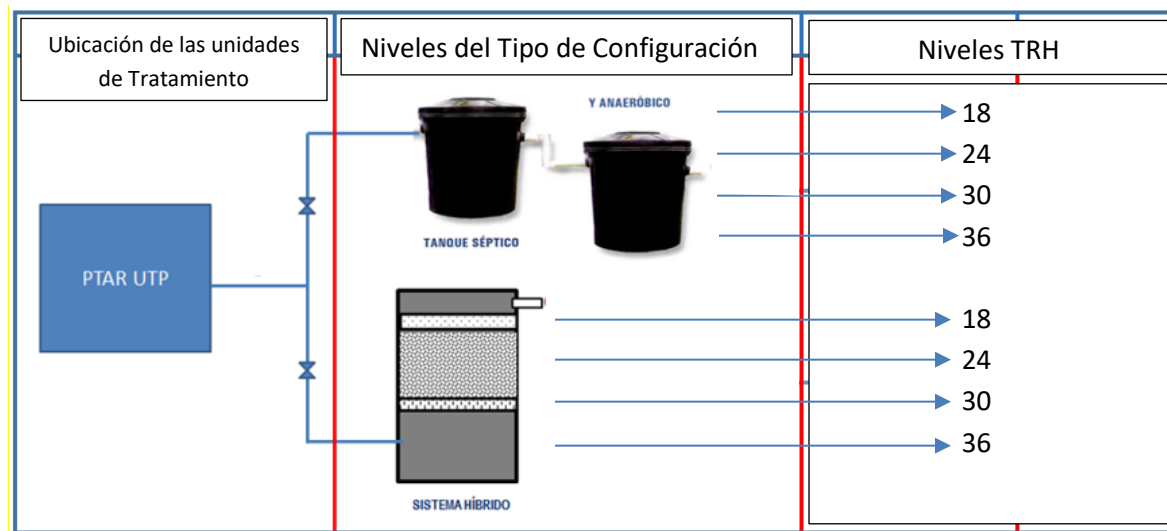


Figura 10. Diagrama del Diseño Experimental Fuente: Elaboración propia

7.5.1 Disposición o combinación de niveles de los factores: Tratamientos

El número de tratamientos aplicados sobre la matriz de agua residual doméstica corresponde a un arreglo factorial , $2^4=16$ tratamientos, los cuales vinculan 4 niveles de los tipos de Reactores (TF1, TF2, SH1 y SH2) y 4 niveles de los tiempos de retención hidráulica. Cada tratamiento u observación se planificó para ser replicado 9 veces, de tal manera que la combinación de un reactor y los cuatro tiempos de retención correspondiera a 36 observaciones (una observación semanal); al considerar los 16 tratamientos y las 9 réplicas planificadas, se proyectan $9 \times 16 = 144$ observaciones.

Por razones operativas y disponibilidad de recursos no todas las combinaciones de tratamientos se replicaron el mismo número de veces y, además, algunas observaciones no pudieron ser medidas; con lo cual resultó un modelo factorial con réplicas, pero desbalanceado e incompleto, lo cual se aprecia en las tablas generalizadas de resultados expuestas en el Anexo A. Sin embargo, el modelo multifactorial ejecutado tiene en cuenta el desbalanceo y los datos faltantes, de tal manera que hace un ajuste para que no se vea afectado el ANOVA.

En la siguiente tabla (tabla 6) se resumen los factores, niveles, nombres y códigos de los tratamientos, además de los períodos u orden de las semanas de seguimiento de las observaciones experimentales planificadas. La tabla además muestra las disposiciones de las parejas de reactores mostradas como bloques. En el primer bloque TF1 y SH1 y en el segundo bloque TF2 SH2.

Tabla 6. Resumen de Factores, Niveles, Nombres, Códigos de Tratamientos y Orden de Semanas de Experimentación

BLOQUE	Orden de Semanas de Seguimiento	Nombre del tratamiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	Tipo Reactor (TF_SH)	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)
Bloque1	1 a 9	Tanque SépticoFiltroAnaerobio1_36horas	TF1_36	TF1	36
Bloque1	10 a 17	Tanque SépticoFiltroAnaerobio1_30horas	TF1_30	TF1	30

BLOQUE	Orden de Semanas de Seguimiento	Nombre del tratamiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	Tipo Reactor (TF_SH)	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)
Bloque1	18 a 23	Tanque SépticoFiltroAnaerobio1_24horas	TF1_24	TF1	24
Bloque1	24 a 28	Tanque SépticoFiltroAnaerobio1_18horas	TF1_18	TF1	18
Bloque1	1 a 9	SistemaHibrido1_36horas	SH1_36	SH1	36
Bloque1	10 a17	SistemaHibrido1_30horas	SH1_30	SH1	30
Bloque1	18 a 23	SistemaHibrido1_24horas	SH1_24	SH1	24
Bloque1	24 a 28	SistemaHibrido1_18horas	SH1_18	SH1	18
Bloque2	1 a 9	Tanque SépticoFiltroAnaerobio2_36horas	TF2_36	TF2	36
Bloque2	10 a 17	Tanque SépticoFiltroAnaerobio2_30horas	TF2_30	TF2	30
Bloque2	18 a 23	Tanque SépticoFiltroAnaerobio2_24horas	TF2_24	TF2	24
Bloque2	24 a 28	Tanque SépticoFiltroAnaerobio2_18horas	TF2_18	TF2	18
Bloque2	1 a 9	SistemaHibrido2_36horas	SH2_36	SH2	36
Bloque2	10 a 17	SistemaHibrido2_30horas	SH2_30	SH2	30
Bloque2	18 a 23	SistemaHibrido2_24horas	SH2_24	SH2	24
Bloque2	24 a 28	SistemaHibrido2_18horas	SH2_18	SH2	18

Fuente: El Autor

Dentro del diseño se consideró en teoría a TF2 y SH2 como sistemas exactamente iguales a sus correspondientes TF1 y SH1, sin embargo, para el modelo experimental propuesto cada configuración fue tratada como un nivel y fue parte del estudio para evaluar sus semejanzas o diferencias en desempeño.

7.5.2 Modelo estadístico

Se aplicó un diseño experimental mediante la adopción de un modelo estadístico multifactorial, con la siguiente expresión:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + (TRH)_j + (R \times TRH)_{ij} + \xi_{ijk}$$

Este modelo incorpora el efecto del tipo de reactor o configuración del tiempo de retención hidráulica y sus posibles interacciones, donde:

Y: Variable respuesta obtenido en cada observación o tratamiento y calculado como %Remoción (DBO₅; DQO o SST)

μ : Promedio generalizado de % de Remoción (DBO₅; DQO o SST)

R_i : Efecto del Tipo de Reactor: TF1, SH1, TF2, o SH2

(TRH)_j: Efecto del Tiempo de retención hidráulica aplicada: 18h, 24 h, 30h y 36 h

(R_i×TRH)_{ij}: Efecto de Interacción entre factores, Tipo de Reactor × Tiempos de retención hidráulica.

ξ_{ij} : Error

i: 1,2...**a**, Niveles del factor Tipo de Reactor o Configuración

j: 1,2...**b**, Niveles del factor Tiempo de Retención Hidráulica

K: 1,2...**n**, número de Réplicas

Basados en la hipótesis de investigación planteada se determinó el efecto de la Cargas Orgánicas en kg/h y medidas como DBO₅, DQO y los SST, las cuales fueron calculadas así: Caudal × Concentración, pero utilizándolas en el modelo factorial no como un factor controlado directamente sino como una covariable, con lo cual el modelo factorial planteado se complementa mediante la introducción de este efecto (covariable) representado por el coeficiente β y las diferencias entre las observaciones correspondientes de la covariable y su promedio ($x_{ijk} - \bar{x}$), aquí se considera que puede existir una dependencia lineal entre la variable respuesta Y_{ijk} y la covariable X , con lo que β , se asemeja a un coeficiente de regresión lineal. El modelo complementario se representa de la siguiente forma:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + (TRH)_j + (R \times TRH)_{ij} + \beta(x_{ijk} - \bar{x}) + \xi_{ijk}$$

7.5.3 Variables respuesta

Durante la experimentación se llevó a cabo la medición de diversos parámetros al agua residual doméstica, tanto a la entrada (sobre el agua de alimentación a los sistemas-Afluente) como a la salida de cada sistema (luego de aplicados los tratamientos). Los parámetros medidos correspondieron al seguimiento de pH, Temperatura, Conductividad, Alcalinidades, Acidos grasos volátiles, DBO₅, DQO y SST.

De esta manera se tomaron muestras a la entrada del sistema de distribución del agua residual que se empleó como alimentación y a la salida de cada unidad experimental, para analizar el

contenido de DQO, DBO₅ y SST, lo cual permitió obtener para cada tratamiento, las eficiencias de remoción como el porcentaje de lo obtenido a la salida con respecto a la entrada, para establecer así, cual sistema fue el más adecuado para dicha remoción.

Los % de Remoción se usaron como las variables respuesta principales y se calcularon mediante la siguiente expresión:

% de Remoción =
$$\frac{(\text{Parámetro Entrada} - \text{Parámetro Salida})}{(\text{Parámetro Entrada})} \times 100$$
 , teniendo en cuenta, que los caudales a la entrada y salida de los sistemas se consideraron iguales.

7.6 Hipótesis estadísticas

Como complemento al planteamiento del problema y a la hipótesis de investigación se propusieron las siguientes hipótesis estadísticas, las cuales se formularon, tanto teniendo en cuenta los factores individuales como de manera multifactorial y se analizaron mediante técnicas de análisis de varianza ANOVA:

7.6.1 Hipótesis en relación a los ANOVAS unifactoriales

Hipótesis de Igualdad de medias (H₀): los promedios formados por los grupos de los niveles de cada factor son iguales entre si, **vs La Hipótesis alterna (H_a):** Existe al menos un promedio diferente dentro de los grupos formados por los niveles de cada factor.

7.6.2 Hipotesis en relacion al ANOVA multifactorial

Hipótesis nula o de Igualdad de medias (H₀), para Factores Principales, tipo de reactor (R) y tiempo de retención hidráulica (TRH):

Hipótesis nula (H₀): $R_1=R_2=...=R_a=0$; $(TRH)_1=(TRH)_2=...=(TRH)_b=0$: equivalente a que los efectos del tipo de reactor y tiempo de retención hidráulica sobre la variable respuesta son 0; es decir los promedios de los % de remoción, debidos a estos factores son iguales.

Hipótesis alterna (H_a): Al menos un $R_i \neq 0$ y/o un $(TRH)_j \neq 0$: equivalente a que al menos uno de los efectos del tipo de reactor y/o tiempo de retención hidráulica sobre la variable

respuesta es diferente de 0; es decir, al menos un par de promedios de los % de remoción debidos al tipo de reactor y/o tiempo de retención hidráulica son diferentes entre sí, al realizar comparaciones por pares de promedios.

Interacciones binarias: $R \times TRH$:

Hipótesis nula (H_0): $(R \times TRH)_{ij} = 0$; el efecto debido a las interacción **tipo de reactor \times tiempo de retención hidráulica**; es igual a 0; es decir los promedios de los % de remoción, debidos a la interacción binaria son iguales.

Hipótesis alterna (H_a): Al menos un $(R \times TRH)_{ij} \neq 0$: al menos uno de los efectos debido a la interacción **tipo de reactor \times tiempo de retención hidráulica**, sobre la variable respuesta es diferente de 0; es decir al comparar por pares, los promedios de los % de remoción debidos a la interacción binarias al menos un par es diferente entre sí.

7.6.3 Hipótesis al vincular las cargas orgánicas, como covariable dentro del modelo

Se probaron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): no existe diferencias en los promedios de las variables respuestas al comparar entre grupos de niveles de factores o sus interacciones, es decir los efectos de los factores o sus interacciones son iguales a 0.

Hipótesis alterna (H_a): existe al menos un par de los promedios de las variables respuestas diferente entre sí al comparar por pares entre medias de grupos de niveles de factores o sus interacciones, es decir al menos uno de los efectos de los factores o sus interacciones es diferente de 0.

En general se esperó que el modelo multifactorial explicara de manera satisfactoria la varianza en las variables respuesta y que al introducir la covariable el modelo fuera aún más eficiente en la explicación sobre la varianza de las variables % de remoción DBO₅, DQO y SST.

7.6.4 Hipótesis de Validación de Supuestos para Aplicación de Técnicas Estadísticas ANOVA

Hipótesis de Normalidad:

Hipótesis nula (**H0**): Los grupos formados por los niveles de los factores o sus interacciones se comportan de manera Normal **vs** la Hipótesis alterna (**Ha**): los grupos no tienen una distribución normal.

Hipótesis o supuesto de Homogeneidad de Varianza (Homocedasticidad):

Hipótesis Nula (**H0**): Los grupos formados por los niveles de los factores o sus interacciones al ser comparados entre sí, tienen varianzas o dispersiones similares y homogéneas **vs** la hipótesis alterna **Ha**: Los grupos al ser comparados entre sí son Heterocedásticos o tienen varianzas no homogéneas.

Hipótesis de Independencia:

Hipótesis Nula (**H0**) : Las observaciones obtenidas por cada grupo o nivel de los factores en estudio son independientes entre sí comportándose de manera aleatoria **vs** la hipótesis alterna (**Ha**): las observaciones no son aleatorias o están correlacionadas. Se utilizó para la validación de hipótesis estadísticas y supuestos un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y se compara frente a los P-valores de cada prueba con lo que no se rechaza la hipótesis nula **H0** si P-Valor $>0,05$ o se acepta **Ha** si P-Valor $< 0,05$.

Se contrastaron los supuestos o hipótesis estadísticas tanto para validar la aplicación de las técnicas de análisis de varianza (supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia) como las hipótesis relacionadas con el análisis estadístico paramétrico de comparación para promedios de variables respuestas, entre grupos de niveles (y/o sus interacciones) de factores, tanto en anovas unifactorial como multifactorial.

7.7 Metodologías para alcance de objetivos

7.7.1 Metodología – objetivo específico #1

Para dar cumplimiento al objetivo específico # 1: *Implementar un reactor híbrido que combine tanque séptico con filtro anaerobio en una sola unidad de tratamiento.*

Se inició con una primera etapa que consistió en previa revisión de literatura en la que se investigaron los aspectos de diseño y operación de un sistema de tratamiento híbrido como son alturas del medio filtrante, volumen del reactor, eficiencia de remoción alcanzadas, factores limitantes, entre otros. Esta revisión permitió definir las condiciones adecuadas, para llevar a cabo la construcción e implementación del sistema híbrido. Cabe resaltar que la ubicación de este fue en las instalaciones de una de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la UTP y que como se indicó anteriormente tiene un duplicado, por lo tanto, se constituyeron dos sistemas híbridos y dos sistemas convencionales que permitieron la comparación entre los mismos.

7.7.1.1 Metodología, Cálculo y Diseño Reactor Híbrido.

En consideración al primer objetivo específico se describe la metodología seguida para el cálculo y diseño del reactor que permita tratar y depurar el agua residual doméstica proveniente de la Facultad de Bellas Artes en la UTP.

Como idea general se tiene la construcción de una unidad en material de fibra de vidrio que integre las dos secciones tanque séptico y FAFA alimentada por la parte inferior con el afluente y con salida del efluente por la parte superior con una campana de separación de gas-líquido y deflectores laterales que ayuden en esta separación de fases. Se complementó con accesorios para tuberías, sistemas de distribución, drenajes, toma muestras y medios filtrantes en material plástico de adecuada resistencia mecánica y química como el PVC y/o polipropileno. La unidad se hizo con una forma geométrica de columna prismática, con la dimensión de altura mayor que el ancho y la profundidad, con un ensanchamiento en la parte

superior, que produjo un cambio de velocidad del agua y facilitó la minimización de pérdida de sólidos en el agua efluente, lo que permitió la captura y separación de gases con una zona prismática superior contigua al ensanchamiento y que descargó el agua clarificada a una canal ubicada en el perímetro interno cerca al borde superior del reactor. (*ver esquemas sección corte frontal y vista superior diseños reactor híbrido*).

Se muestra el siguiente esquema de flujo para cálculos secuenciales en el diseño del reactor híbrido.

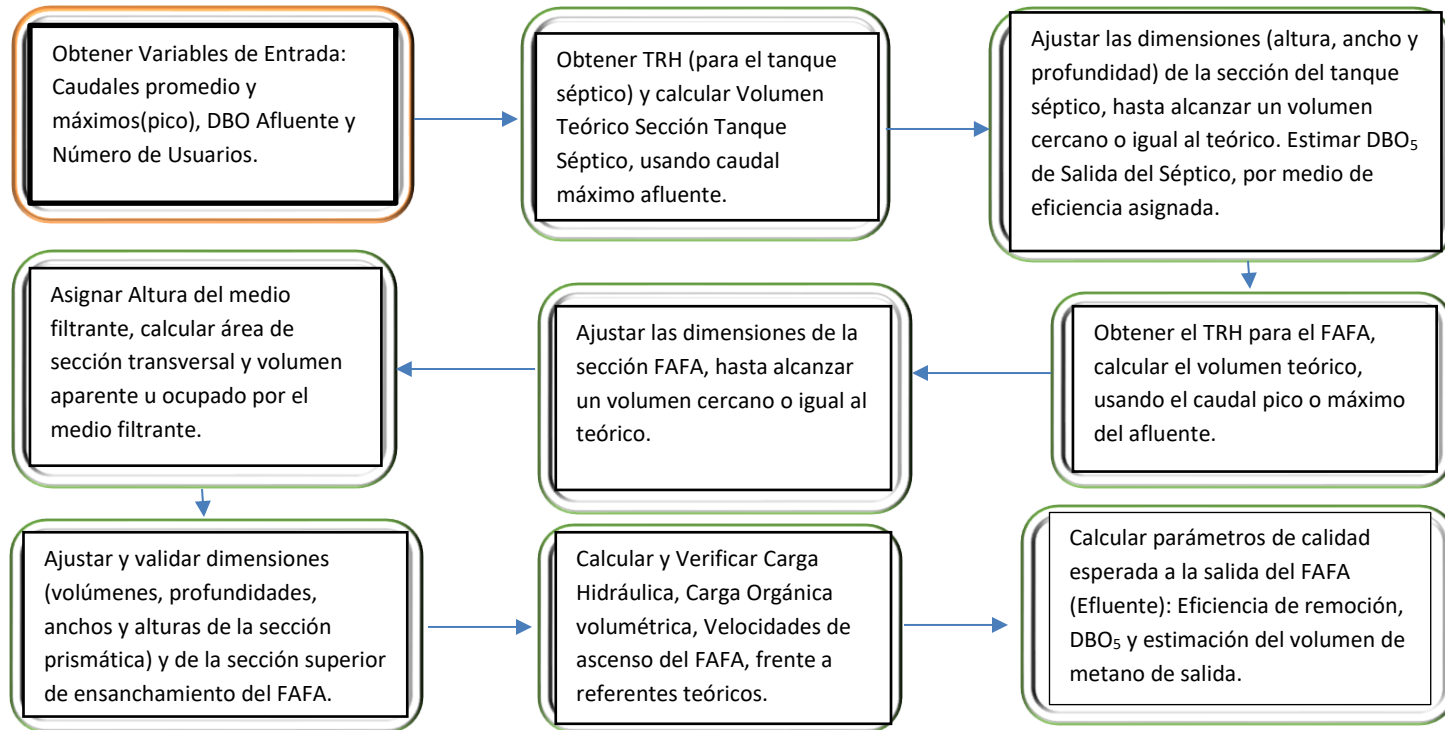


Figura 11. Diagrama de Flujo de Cálculos y Estimación de Parámetros de Reactor Híbrido Fuente Propia

Una desventaja para el diseño del reactor es que no se cuenta con estudios cinéticos previos que permitieran tener valores concretos de constantes y de velocidades de transformación de sustrato y de producción de biomasa, por lo cual alguno(s) valor(es) será(n) estimado(s) usando relaciones o ecuaciones como las presentadas anteriormente de los estudios de Young.

El dimensionamiento de la unidad se tuvo en cuenta la zona inferior para tanque séptico y una zona superior para el filtro anaerobio de flujo ascendente. Como criterio de partida el reactor se adecuó a una estructura existente que proporcionaba dimensiones con un volumen o capacidad entre 800 y 1200L. No obstante que es condición imprescindible que el volumen debe ajustarse con los datos disponibles o característicos del agua a tratar.

7.7.1.2 Guía de dimensionamiento y verificación de parámetros

Se usó una hoja de cálculo e Excel donde se alimentaron en las fórmulas pertinentes que relacionan los distintos factores y variables a tener en cuenta para el dimensionamiento del reactor, así como la verificación paralela de las variables de calidad en el efluente. Todos los datos con información de variables o parámetros de entrada y cálculos o variables de salida se consignan de manera pormenorizada en una tabla presentada en el capítulo de resultados y análisis de resultados.

Algunos de los cálculos se llevaron a cabo de manera iterativa. Todos los cálculos de volúmenes, áreas, longitudes se realizaron en m^3 , m^2 y m respectivamente, tiempos en horas (h), concentraciones en mg/L o Kg/m^3 y demás unidades consistentes de acuerdo con la conveniencia de presentación de resultados.

7.7.2 Metodología – Objetivo Específico # 2

Para dar cumplimiento al objetivo específico # 2: *Determinar las eficiencias de remoción de contaminantes característicos del ARD (materia orgánica y sólidos) en el sistema híbrido tanque séptico – filtro anaerobio y compararlo frente al sistema convencional.*

Después de llevar a cabo la fase de estabilización de los sistemas se dio la puesta en marcha de esta investigación del segundo objetivo, donde como se mencionó anteriormente fue establecer las eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de DQO y DBO_5 y de SST, a medida que se modificó la carga orgánica mediante el ajuste de los tiempos de retención planificados.

La determinación de los % de remoción se realizó analizando dichos parámetros (tanto en el afluente como en los efluentes objeto de estudio y obtenidos de las muestras recolectadas semanalmente). Los métodos utilizados correspondieron a los mencionados en la tabla 3 los cuales se emplearon en el Laboratorio de Procesos Biológicos de la UTP.

Una vez obtenidos los resultados fueron evaluados estadísticamente, utilizando el software IBM SPSS Statistics 20, el cual permitió mediante el análisis de datos determinar criterios de viabilidad del uso del sistema híbrido en zonas rurales como alternativa para llevar a cabo la remoción de contaminantes característicos del ARD.

7.7.3 Metodología – Objetivo Específico #3

Para dar cumplimiento al objetivo específico # 3: *Determinar el efecto del caudal del afluente, traducido como carga orgánica, frente a la eficiencia de remoción del sistema híbrido y compararlo con la configuración tradicional*; se usó el concepto o conocimiento que se tiene en relación con que los sistemas sépticos tradicionales tienen un óptimo de remoción con tiempos de retención hidráulica de 24 h (Chernicharo, 2013. Pág 161), se considera este mismo tiempo de retención para evaluar los parámetros de eficiencia del sistema híbrido a lo largo de tres meses. Posterior a este tiempo se modificó el tiempo de retención hidráulica del sistema híbrido disminuyéndolo a 18 horas durante tres meses con la finalidad de comprobar que este tiempo de retención presenta eficiencias similares al sistema tradicional con 24 horas de retención. Se evaluaron igualmente tiempos de retención de 30 y 36 horas. El efecto del caudal se vislumbró a través de su conversión a la variable carga orgánica, mediante la multiplicación por la concentración del contaminante y lo cual se estableció en el planteamiento del modelo factorial:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + (TRH)_j + (R \times TRH)_{ij} + \beta(x_{ijk} - \bar{x}) + \xi_{ijk}$$

El cual posteriormente se analizó usando la herramienta de ANOVA multifactorial con covariable

7.8 Metodologías y técnicas estadísticas de análisis de información obtenida

Para el análisis de la información obtenido se utilizaron técnicas de análisis descriptivo y de análisis de varianza ANOVA, tanto considerando los factores tipo de reactor y tiempo de retención hidráulica de manera independiente, así como de manera interdependiente como lo plantea el modelo antes propuesto o modelo multifactorial.

La validación de supuestos previo a la aplicación de las técnicas ANOVA, exige idealmente, el cumplimiento de estos (normalidad, homocedasticidad e independencia), siendo crítico el cumplimiento del supuesto de independencia en contraste con el cumplimiento de la normalidad y de la homocedasticidad, donde, las técnicas ANOVA son robustas y pueden aplicarse aún con desviaciones moderadas de estos dos supuestos sin haber consecuencias graves prácticas.

Los estadísticos y pruebas utilizados a través de los programas estadísticos de SPSS y Excel para evaluar las hipótesis anteriores y realizar el análisis general fueron:

- ❖ Estadístico de Shapiro Wilks ($n < 30$) para normalidad.
- ❖ Estadístico de Levene para la homogeneidad de varianzas.
- ❖ Estadístico Z, mediante prueba de rachas para la independencia.
- ❖ Prueba robusta de Welch para igualdad de medias.
- ❖ Prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, para rangos promedio.

8 PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 1. DISEÑO DE UN REACTOR HIBRIDO.

Se compararon los dos sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas que se diseñaron, construyeron y pusieron en operación para dos tipos de reactores; uno constituido por una serie tanque séptico-filtro anaerobio (sistema convencional) y otro conformado por un sistema híbrido (el cual integra tanque séptico y filtro anaerobio en una sola unidad); ambos sistemas construidos y evaluados por duplicado.

Se muestra a continuación los resultados obtenidos del diseño del reactor híbrido:

8.1.1 Información general del ARD a tratar

Caudal Medio **Qm** en L/s, número de usuarios **c**, Demanda Bioquímica de Oxígeno **DBO₅** en el afluente y caudal afluente promedio o promedio, **Qm**:

$Q_m=0,0109$ L/s, es el caudal correspondiente al TRH de diseño de 24 h

$DBO_5=200$ mg/L obtenido a partir de datos o mediciones preliminares.

Número de usuarios=4

8.1.2 Cálculo del volumen teórico y real del tanque séptico, C

Se calcula el volumen de la cámara inferior asignada como tanque séptico para lo cual se aplica la fórmula:

Teniendo en cuenta información preliminar de valores de caudales históricos en dicho sistema, dimensiones preliminares disponibles para el reactor híbrido y valores bibliográficos que aportan Young, Chernicharol y Rojas, se debe estimar que, para un rango de volumen entre 800 L y 1200 L disponibles, se puede trabajar con TRH teóricos alrededor de 8 y 11 h

para el FAFA, lo que conlleva a estimar el TRH para el TS con la finalidad de que se mantengan las medidas preliminares establecidas.

$C = Q_m \times \text{TRH}$, el tiempo de retención hidráulica se asume como 12,9 h

$$C = 0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ L} \times 12,9 \text{ h} = 0,506 \text{ m}^3$$

Con el volumen teórico obtenido C del tanque séptico se asignan las tres dimensiones, ancho (**a**), altura de agua, **h_a** (asignada como altura desde el fondo hasta el inicio del medio filtrante del FAFA) y el fondo (**L**) del tanque séptico; tanto el ancho como el fondo calculado para el tanque séptico serán las mismas dimensiones para toda la sección prismática y que harán parte del volumen FAFA.

Las tres dimensiones asignadas se escogen de tal manera que el valor del volumen sea cercano a 0,166 m³; para nuestro caso se aceptan **a**=0,7m; **h_a**=0,9m y **L**=0,6m, con lo cual el volumen real sería:

$$V_R = 0,378 \text{ m}^3$$

Se procede a asignar un % de eficiencia de remoción con el supuesto teórico de que en un tanque séptico la remoción puede oscilar alrededor del 50%.

Con el anterior valor $\%R_{\text{TQsep}} = 50\%$, se calcula la DBO₅ que habría en la salida (zona superior del volumen calculado del Tanque séptico), teniendo en cuenta que la DBO₅ en el afluente es de 200 mg/L

$$\text{DBO}_{5\text{TQsep}} = 200 \text{ mg/L} - ((200 \text{ mg/L} \times 50\%)/100) = 100 \text{ mg/L}$$

8.1.3 Cálculo del volumen teórico total FAFA, C_{FAFA} y parámetros medio filtrante

De manera semejante al cálculo del volumen del tanque séptico, se usa un TRH (asumido) para el volumen del FAFA y se usa el caudal del afluente para calcular el volumen teórico así:

TRH_{FAFA} asumido: 10 h (valor ajustado por el prediseño)

Volumen Teórico Total del FAFA: C_{FAFA}

$$C_{FAFA} = Q_m \times TRH_{FAFA} = 0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ L} \times 6,7 \text{ h} = 0,392 \text{ m}^3$$

Altura del Filtro (Material de Empaque) a_{mf} : Se asume como $a_{mf} = 0,5 \text{ m}$

Altura Libre encima del Medio Filtrante, a_{Le} : Corresponde a la altura desde la parte superior del medio filtrante, hasta el borde libre del agua (salida efluente) y es la sumatoria de tres secciones de altura descritas en la tabla de cálculos presentada. Las alturas son ajustadas de manera iterativa en la hoja de cálculo para mantener el volumen de la Sección FAFA

Altura Libre encima del Medio Filtrante, $a_{Le} = 1,06 \text{ m}$

Altura desde la superficie del medio filtrante hasta el fin de la sección prismática, a_{fp} : Estimada como $a_{fp} = 0,56 \text{ m}$, para mantener los volúmenes calculados.

8.1.4 Dimensiones asumidas, cálculo del área y volumen aparente del empaque

El ancho y profundidad, a y L_{FAFA} , son iguales a las dimensiones correspondientes de la sección del tanque séptico, 0,7m y 0,6m respectivamente.

El área de empaque o área filtrante A_{mf}

se calcula como: $A_{mf} = a \times L_{FAFA}$

$$A_{mf} = 0,7 \times 0,6 = 0,42 \text{ m}^2$$

Volumen (Total Aparente) ocupado por el empaque, V_{mf} :

$$V_{mf} = A_{mf} \times a_{mf}$$

$$V_{mf} = 0,42 \text{ m}^2 \times 0,5 \text{ m} = 0,21 \text{ m}^3$$

Estas variables son necesarias para calcular las cargas hidráulicas, cargas orgánicas volumétricas y velocidades de ascenso.

8.1.5 Ajuste volumen total real del FAFA

En las tablas adjuntas se discriminan las secciones de volumen que componen el FAFA y que se ajustaron con las dimensiones asumidas, para obtener un volumen total Real del reactor como la suma de las secciones tanque séptico y FAFA más el volumen correspondiente al borde libre por encima del canal colector perimetral, de salida del efluente. El volumen de sólo la sección FAFA se ajustó ligeramente por encima del valor teórico ($0,392 \text{ m}^3$) a $0,432 \text{ m}^3$:

De esta manera el Volumen total de equipo construido será:

$$VT = 0,432 \text{ m}^3 + 0,506 \text{ m}^3 = 0,938 \text{ m}^3, \text{ 938 L de capacidad.}$$

8.1.6 Verificación parámetros de cargas en FAFA

Carga Hidráulica Volumétrica , CH:

$$CH = Q_m / A_{mf}, CH = (0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L}) / 0,42 \text{ m}^2$$

$CH = 2,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$: Los investigadores recomiendan valores entre 6 y 15. El valor estimado sería inferior, lo que puede implicar un decaimiento en la eficiencia de remoción esperada a la salida del FAFA.

calculada con base al caudal del efluente para TRH de 24 h el volumen aparente del medio filtrante y la DBO_5 , obtenida a la salida de la sección del tanque séptico:

$$\text{COV}_{mf} = ((Q_m) \times \text{DBO}_{5, \text{STQSep}}) / V_{mf}$$

$$\text{COV}_{mf} = (0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L}) \times 100 \text{ mgDBO}_5/\text{L} \times (1 \text{ kg} / 1 \times 10^6 \text{ mg}) / 0,21 \text{ m}^3$$

$\text{COV}_{mf} = 0,45 \text{ KgDBO}_5/\text{m}^3\text{d}$, según la recomendación de los investigadores (Chernicharo, 2013. Pág 5) debería estar entre 0,25 y $0,75 \text{ KgDBO}_5/\text{m}^3\text{d}$.

$$COC_{FAFA} = ((Q_m) \times DBO_{5,STQSep}) / C_{FAFA}$$

$$C_{FAFA} = 0,392 \text{ m}^3$$

$$COC_{FAFA} = 0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L} \times 100 \text{ mg DBO}_5 / \text{L} \times (1 \text{ kg} / 1 \times 10^6 \text{ mg}) / 0,392 \text{ m}^3$$

$COC_{FAFA} = \mathbf{0,22 \text{ Kg DBO}_5 / \text{m}^3 \text{d}}$, es recomendable un valor entre 0,15 y 0,50 $\text{Kg DBO}_5 / \text{m}^3 \text{d}$ (Chernicharo, 2013. Pág 5).

Velocidad de ascenso en la sección del prisma inferior calculada como la relación entre el caudal medio y el área de sección transversal del prisma inferior:

$$V_{asc} = Q_{m\acute{a}x} / A_{mf}$$

$$V_{asci} = 0,0109 \text{ L/s} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L} \times 3600 \text{ s/h} / 0,42 \text{ m}^2$$

$V_{asci} = \mathbf{0,09 \text{ m/h}}$, se recomienda valores entre 0,3 y 1 m/h (Chernicharo, 2013. Pág 5). El valor estimado sería inferior, lo que puede implicar un decaimiento en la eficiencia de remoción esperada a la salida del FAFA.

De igual manera se calcula la velocidad de ascenso en el prisma superior o zona ancha antes del ingreso a la canal de recolección de agua clarificada usando el área de la sección superior (Arista de ensanchamiento x Profundidad):

$$A_{ps} = b \times L_{FAFA}$$

$$A_{ps} = 0,93 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,558 \text{ m}^2$$

$$V_{ascs} = 0,0109 \text{ L/s} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ L} \times 3600 \text{ s/h} / 0,5115 \text{ m}^2$$

$V_{ascs} = \mathbf{0,20 \text{ m/h}}$ se recomienda valores entre 0,3 y 1 m/h (Chernicharo, 2013. Pág 5) y al estar por debajo del rango, puede afectar la eliminación del gas, sin embargo se debe tener en cuenta, que el cálculo está hecho para valores picos de caudal y por tanto, esta no sería la condición normal o de la mayoría de veces del caudal afluente.

8.1.7 Calidad estimada en el efluente del FAFA

Se calculan los parámetros eficiencia esperada del FAFA mediante la ecuación siguiente y utilizando el TRH_{FAFA} asignado:

$$\%R_{FAFA} = (1 - 0,87 \times (TRH_{FAFA})^{-0,5}) \times 100$$

La anterior ecuación aparece referenciada por el autor Carlos Augusto de Lemos Chernicharo en su obra, *Biological Wastewater Treatment In Warm Climate Regions* del año 2005. pág. 737. Esta ecuación básicamente corresponde a la expresión investigada por Young.

Con el resultado de la anterior ecuación se calcula la calidad del efluente medido como concentración en mg/L de DBO_5 . Se calcula además la cantidad aproximada de metano producida:

$$\%R_{FAFA} = (1 - 0,87 \times (10 \text{ h})^{-0,5}) \times 100$$

$$\%R_{FAFA} = 72,5$$

$$DBO_{5SFAFA} = DBO_{5STQSep} - (DBO_{5STQSep} \times \%R_{FAFA} / 100)$$

$$DBO_{5SFAFA} = 100 \text{ mg } DBO_{5STQSep} / L - (100 \text{ mg } DBO_{5STQSep} / L \times 72,5 / 100) = 27,5 \text{ mg/L}$$

Para calcular la cantidad de Metano, se trabaja con la aproximación sugerida en el artículo de Young James C. (*factors affecting the design and performance of up flow anaerobic filters, wat. Sci.tech Vol4 .199*). Donde se producen 390 L de Metano por Kg de DQO eliminado a 37 Celsius y considerando una relación promedio de DQO a DBO como 2 a 1 (*Romero Rojas Jairo A, pag 55.2002*); dado que, en las variables de entrada de nuestro sistema se dispone de las mediciones de DBO y los cálculos de remoción se han estimado con relación a este parámetro.

$$m^3CH_4/d = ((390 \text{ L/Kg } DQO_{Eliminado}) \times 2 \times (DBO_{5Afluente} - DBO_{5SFAFA}) \times (Q_m) \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d}) / 1 \times 10^9$$

$$m^3CH_4/d = ((390 \text{ L/KgDQO}_{\text{Eliminado}}) \times 2 \times (200 \text{ mg/L} - 33,6 \text{ mg/L}) \times 0,0109 \text{ L/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d}) / 1 \times 10^9$$

$$m^3CH_4/d = \mathbf{0,063}$$

Estos valores teóricos de calidad esperados en % de remoción (72,5) y en salida de DBO₅ del efluente (27,5 mg/L) se toman como la proyección de la operación del reactor propuesto y se pueden considerar como valores aceptables y cumplen con la legislación colombiana tomando como referencia la DBO₅, dado además los soportes teóricos presentados en la investigación bibliográfica y considerando que la remoción proyectada está basada en la concentración teórica de DBO₅ posiblemente entregada a la salida de la sección del tanque séptico donde ya se ha estimado una remoción del 50 %.

8.1.8 Condiciones finales de adecuación del reactor

Finalmente se debe adecuar el reactor con un medio filtrante o empaque con elementos tipo rosetones en polipropileno que cubran el volumen V_{mf} y alturas a_{mf} calculados dispuestos sobre un soporte con una malla de acero de forma rectangular de perímetro y área igual a la sección transversal del cuerpo inferior del reactor (sección prismática de filtración), la malla ha de ir anclada a la estructura interna del reactor. El reactor debe disponer de una campana de separación de las fases gas y líquido con una altura de 0,6 m, un diámetro de 0,40 m y un ducto de salida de diámetro 0,05 m. En el borde superior del reactor debe adecuarse un colector para recibir el agua clarificada ubicado en el perímetro interno de manera rectangular con una altura de 0,05 m de canal y un ancho por la parte frontal de 0,05 m y por la parte lateral (o fondo) de 0,1 m; el agua tratada ascenderá por rebose hasta esta canaleta perimetral para descargar en la tubería de salida del efluente de diámetro 1 ½ pulgadas.

El reactor debe tener toma muestras con sus respectivas válvula, ubicados a la mitad aproximadamente del medio filtrante y en la salida del medio filtrante para lo que se requiere colocar tuberías de PVC de diámetro de 1/2 pulgada y espaciadas entre si aproximadamente 0,5 m; además debe disponer de una tubería de ingreso del afluente de diámetro ¾ de pulgada la cual debe estar perforada en toda su longitud con 4 perforaciones de diámetro de 0,5 cm y

espaciadas cada 0,16 m; la tubería de ingreso debe ir anclada al piso o a las paredes laterales para evitar riesgo de colapso por su propio peso y/o el peso del agua. Debe ubicarse un drenaje de lodos a nivel del piso de la sección correspondiente al tanque séptico con un diámetro 1 ½ pulgadas. Debe tenerse en cuenta que el reactor debe poseer una tapa, de tal forma que el sistema esté protegido del ingreso de agua lluvia.

Los demás parámetros como dimensiones de la campana de separación de gas y líquidos características del distribuidor del afluente y las características del deflector, así como las estimaciones de tiempos para efectuar mantenimientos de acuerdo con la tasa de acumulación de lodos se resumen en los dibujos o planos en corte de la vista frontal y vista superior del reactor y también se resumen todos los resultados en las tablas elaboradas en Excel y presentadas a continuación.

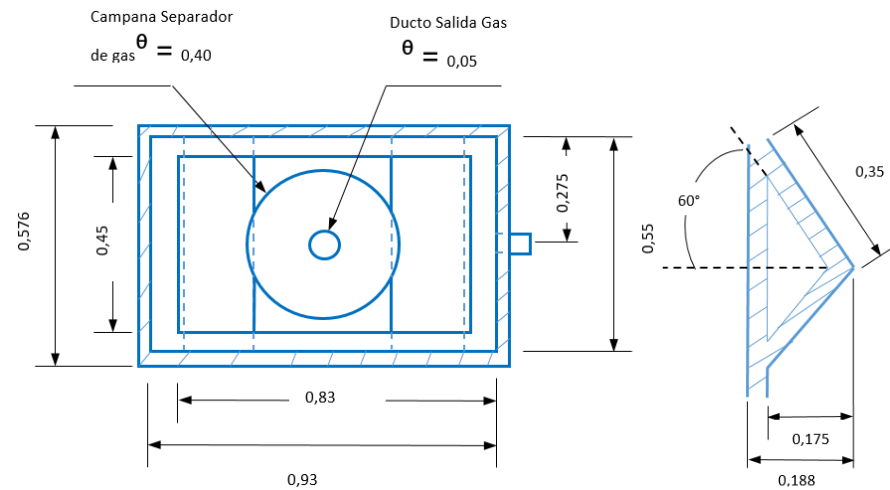


Figura 13. Vista Superior de Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA y detalle Deflector. medidas en metros. Dibujo sin escala. Fuente propia

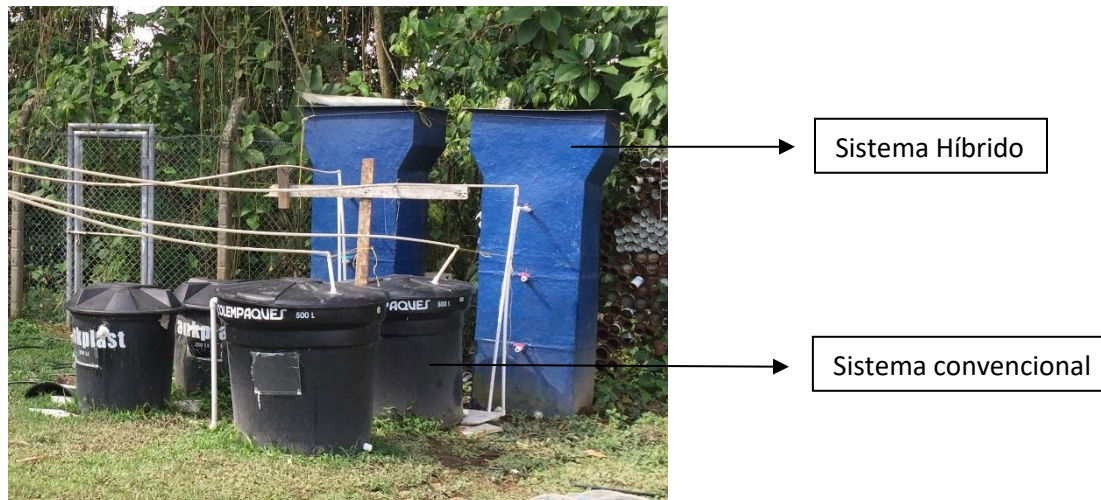


Figura 14. Sistema híbrido tanque séptico – filtro anaerobio ubicado en la Universidad Tecnológica de Pereira

Tabla 7. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA

Número	DATOS GENERALES	Símbolo	Unidades	Valor	Observaciones
1	INFORMACIÓN GENERAL FACTORES Y VARIABLES	Símbolo	Unidades	Valor	Observaciones
1.1	Caudal Medio Agua Residual Afluente	Qm	L/s	0.0109	Caudal Promedio Estimado
1.2	Número de Usuarios	c	Usuarios	4	
1.3	Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/L	200	Valor Típico del agua Residual afluente al reactor híbrido
2	DISEÑO DE TANQUE SÉPTICO				
2.1	Tiempo de Retención Hidráulico	TRH	h	12.9	
2.2	Volumen Teórico Calculado	C	m ³	0.506	Volumen Calculado de la cámara Séptica
2.3	DIMENSIONES ASUMIDAS TANQUE SÉPTICO:				FIGURA O COLUMNA PRISMÁTICA RECTANGULAR, EN POSICIÓN
2.3.1	Profundidad (Fondo)	L	m	0.6	Esta dimensión es igual también para el FAFA
2.3.2	Ancho	a	m	0.7	Esta dimensión es igual también para el FAFA
2.3.3	Altura del Agua	h _a	m	0.9	Se asigna desde el fondo del Reactor hasta Inicio del medio filtrante
2.3.4	Volumen Real	V _R	m ³	0.378	Volumen Real de la cámara Séptica
2.4	Calidad Estimada del Efluente Salida Zona de Tanque				Séptico
2.4.1	Eficiencia Estimada en % de Remoción	%R _{TQSep}	%	50	
2.4.2	Demanda Bioquímica de Oxígeno en Zona superior TQ Séptico	DBO _{5,TQSep}	mg/L	100	Considerado como la salida del tanque séptico
3	DISEÑO DE FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE FAFA:				
3.1	Tiempo de Retención Hidráulico	TRH _{FAFA}	h	10	horas
3.2	Volumen Teórico Calculado del FAFA	C _{FAFA}	m ³	0.392	
3.3	Altura del Filtro (material de Empaque)-Asumida	a _{mf}	m	0.5	
3.4	Altura Libre Encima del Medio Filtrante(Salida)	a _{Le}	m	1.06	
3.4.1	Altura desde Medio Filtrante hasta fin Sección Prisma Inferior	a _{fp}	m	0.56	
3.4.2	Altura desde fin Prisma Inferior hasta fin de ensanchamiento	a _e	m	0.20	
3.4.3	Altura desde fin Ensanchamiento hasta borde libre Agua (Salida)	a _{cs}	m	0.30	
3.5	Altura Total de Agua	a _T	m	1.76	
3.6	DIMENSIONES ASUMIDAS:				
3.6.1	Profundidad (Fondo)	L _{FAFA}	m	0.6	Esta dimensión es igual también para el Tq séptico
3.6.2	Ancho (Prisma Inferior)	a	m	0.7	Esta dimensión es igual también para el Tq séptico
3.6.3	Altura del Filtro (material de Empaque)	a _{mf}	m	0.5	
3.7	Área de Empaque o Medio Filtrante	A _{mf}	m ²	0.42	
3.8	Volumen (Total Aparente) ocupado por Empaque	V _{mf}	m ³	0.21	

Tabla 8. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA

3.9	REVISIÓN Y AJUSTE DE VOLUMEN DEL FAFA (C_{FAFA}) :	Símbolo	Unidades		Observaciones
3.9.1	Volumen Total del Empaque	V_{mf}	m^3	0.210	
3.9.2	Volumen Sección Prismática Sobre Medio Filtrante	V_{fp}	m^3	0.235	
3.9.3	Volumen Zona de Ensanchamiento	V_e	m^3	0.069	
3.9.3.1	Ancho Arista de Ensanchamiento	b	m	0.83	
3.9.3.2	Altura Zona Ensanchamiento	h	m	0.15	
3.9.4	Volumen Zona Prismática Superior	V_{cs}	m^3	0.140	
3.9.4.1	Altura Zona Prismática Superior	hs	m	0.25	
3.9.4.2	Ancho Zona Prismática Superior	b	m	0.93	
	Ajuste Volumen Total Real FAFA : $V_{lb}+V_{mf}+V_{fp}+V_e+V_{cs}$	C_{FAFA}	m^3	0.65	
3.10	Revisión Parámetros en Filtro:				
3.10.1	Tiempo de Retención Hidráulico	TRH_{FAFA}	h		
3.10.2	Carga Hidráulica Volumétrica	CH	m^3/m^2d	2.2	Mínimo 6 , Máximo 15
3.10.3	Carga Orgánica con base al Volumen del Medio Filtrante	COV_{mf}	$KgDBO/m^3d$	0.45	Mínimo 0,25 ; Máximo 0,75
3.10.4	Carga Orgánica con base al Volumen total del filtro (C_{FAFA})	COC_{FAFA}	$KgDBO/m^3d$	0.00	Mínimo 0,15 ; Máximo 0,50
3.10.5	Velocidad de Ascenso en Prisma Inferior	V_{asci}	m/h	0.09	0,3 a 1,0 m/h
3.10.6	Velocidad de Ascenso en Prisma Superior	V_{ascs}	m/h	#¡REF!	0,01 a 1,0 m/h
3.11	Calidad Estimada del Efluente FAFA:				
3.11.1	Eficiencia Estimada en % de Remoción	$\%R_{FAFA}$	%	72.5	$\%R_{FAFA}=(1-0,87x(TRH_{FAFA})^{-0,5})x100$
3.11.2	Demanda Bioquímica de Oxígeno en Efluente	$DBO_{5,SFAFA}$	mg/L	27.5	
3.11.3	Cantidad de Metano Producido en el Efluente	Vol CH_4/d	m^3/d	0.063	Se estima como 390 L / Kg DQO eliminado a 37 C
4	Cálculo Frecuencia de limpieza de Cámara de Sedimentación:				Calculada con base en la tasa de acumulación de lodos
4.1	Tasa de Acumulación de Lodos (Tanque séptico)	K_Q	m^3/c año	0.04	Estimada como 0,04 m^3 por persona servida por año
4.2	Capacidad Máxima Estimada de Acumulación de Lodos	C_L	m^3	0.13	Estimada como 1/3 de la cámara de Sedimentación
4.3	Frecuencia de Limpieza	f	años	0.79	Extracción de lodos cada 5 meses aproximadamente

Tabla 9. Cálculos y Ajustes Parámetros de Diseño Reactor Híbrido Tanque Séptico-FAFA

5	Parámetros Campana Separación Líquido -Gas:	Símbolo	Unidades		Observaciones
5.1	Velocidad Estimada de Flujo en la Campana	Vc	m/h	0.374	Estimada como 4 la CH
5.2	Radio Mayor de la Campana	Rc	m	0.20	Diámetro suficiente para cubrir la abertura entre los deflectores
5.3	Área de la Campana	Ac	m ²	0.13	
5.4	Altura de la campana	H _G	m	0.55	
5.5	Diámetro ducto salida gases	dg	m	0.05	
5	Parámetros Deflectores de direccionamiento de gas a la Campana				
5.1	Longitud del traslape	Tv	m	0.35	
5.2	Ancho del traslape	Wd	m	0.175	
5.3	Angulo respecto a la horizontal	α	Grados	60	
7	Distribuidor de Afluente				
7.1	Longitud Total de tubería	L _d	m	0.800	
7.2	Longitud al interior de la sección de tanque Séptico	L _{id}	m	0.650	
7.3	Diámetro tubería (3/4) de pulgada	D _d	m	0.019	
7.4	Sección o área transversal de tubería de afluente	A _{td}	cm ²	2.85	
7.5	Numero de perforaciones	Np	Número	4	Con suma de área equivalente al area transversal de la tubería de entra
7.6	Diámetro de cada perforación	dp	cm	0.48	Se aproxima a 0,5 cm

Fuente Propia.

8.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LAS DOS CONFIGURACIONES EXPERIMENTADAS.

A continuación la tabla 10 presenta parte de las mediciones o resultados obtenidos en las variables o parámetros de entrada para la disposición Tanque Séptico-Filtro Anaerobio1 (TF1) y determinadas para la combinación con los cuatro tiempos de retención evaluados. Los resultados para el resto de configuraciones de reactores tanto en en la medición de variables de entradas y salidas (después de los tratamientos), como en los % de remoción calculados al final de los ensayos se presentan en el Anexo A, Tabla A.1; Tabla A.2 y Tabla A.3.

Tabla 10. Resumen de Valores Obtenidos en Variables Físicoquímicas de Entrada a Sistemas de Tratamiento.

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS MEDIDAS A LAS ENTRADAS (AFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO															
		Caudal L/S	Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ mg/L	Alcalinidad Total CaCO3 mg/L	Ácidos Grasos Volátiles : AGV mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ /L	Nitritos mgNO ₂ /L	SST mg/L	Carga Orgánica DBO ₅ Kg/h	Carga Orgánica DQO Kg/h	Carga Orgánica SST Kg/h
Semana1	TF1_36	0,0054	2033,0	7,8	30,0	300,0	305,0	340,0	177,5	1333,3	4,8	1,8	0,1	6884,0	3,5	25,9	133,8
Semana2	TF1_36	0,0054	2030,0	7,9	25,0	285,0	405,0	330,0	160,0	718,0	5,0	1,6	0,2	1210,0	3,1	14,0	23,5
Semana3	TF1_36	0,0054	2130,0	7,5	26,6	600,0	765,0	360,0	145,0	693,3	36,8	2,0	0,4	297,0	2,8	13,5	5,8
Semana4	TF1_36	0,0054	2200,0	7,5	25,6	630,0	730,0	240,0	42,0	564,7	26,4	3,8	0,4	290,0	0,8	11,0	5,6
Semana5	TF1_36	0,0054	2063,0	7,2	26,0	490,0	580,0	300,0	21,0	913,6	99,5	2,5	0,2	65,0	0,4	17,8	1,3
Semana6	TF1_36	0,0054	2540,0	7,7	24,4	420,0	520,0	192,0	0,0	1100,0	119,0	2,3	0,3	264,0	0,0	21,4	5,1
Semana7	TF1_36	0,0054	1469,0	7,5	26,0	450,0	500,0	180,0	0,0	820,5		2,1	0,2	56,0	0,0	16,0	1,1
Semana8	TF1_36	0,0054	2380,0	7,4	25,8	640,0	750,0	180,0	0,0	543,2	159,0	1,6	0,2	116,0	0,0	10,6	2,3
Semana9	TF1_36	0,0054	2200,0	8,1	27,5	550,0	660,0	240,0	85,0	839,5				317,0	1,7	16,3	6,2
Semana10	TF1_30	0,0065	2540,0	7,7	23,1	620,0	730,0	84,0	187,5	1113,9	170,0	4,1	0,5	867,0	4,4	26,1	20,3
Semana11	TF1_30	0,0065	2320,0	7,9	26,5	550,0	745,0	84,0	112,5	821,9				223,0	2,6	19,2	5,2
Semana12	TF1_30	0,0065	2290,0	7,8	28,7	600,0	780,0	156,0		383,6	176,0	2,6	0,2	127,0	0,0	9,0	3,0
Semana13	TF1_30	0,0065	2000,0	8,1	23,6	670,0	760,0	84,0	30,0	444,4				57,0	0,7	10,4	1,3
Semana14	TF1_30	0,0065	2140,0	8,1	24,6	590,0	710,0	108,0		480,0	149,0	2,2	0,4	97,0	0,0	11,2	2,3
Semana15	TF1_30	0,0065	2330,0	7,8	25,0	400,0	500,0	96,0		746,7				53,0	0,0	17,5	1,2
Semana16	TF1_30	0,0065	1511,0	8,1	23,7	470,0	530,0	84,0	75,0	1743,6	130,0	2,0	0,5	53,0	1,8	40,8	1,2
Semana17	TF1_30	0,0065	1710,0	8,2	24,7	480,0	610,0	156,0	90,0	615,4				130,0	2,1	14,4	3,0
Semana18	TF1_24	0,0081	1213,0	7,9	25,7	375,0	495,0	144,0		512,8				90,0	0,0	15,0	2,6
Semana19	TF1_24	0,0081	1602,0	7,8	26,6	415,0	605,0	156,0	152,5	207,8				83,0	4,4	6,1	2,4
Semana20	TF1_24	0,0081	1534,0	8,1	22,5	450,0	530,0	144,0	185,0	860,8		1,8		57,0	5,4	25,1	1,7
Semana21	TF1_24	0,0081	1512,0	7,8	22,3	420,0	550,0	120,0	172,5	1487,2				63,0	5,0	43,4	1,8
Semana22	TF1_24	0,0081	2416,0	8,1	24,3	500,0	650,0	120,0	157,5	860,8				51,0	4,6	25,1	1,5
Semana23	TF1_24	0,0081	2322,0	8,2	25,2	630,0	690,0	108,0	199,5	1063,3				77,0	5,8	31,0	2,2
Semana24	TF1_18	0,0108	2238,0	8,3	24,5	530,0	660,0	120,0	152,5	842,1				29,0	5,9	32,7	1,1
Semana25	TF1_18	0,0108	2140,0	8,2	23,1	550,0	700,0	180,0	180,0	950,0				74,0	7,0	36,9	2,9
Semana26	TF1_18	0,0108	2300,0	8,0	23,6	560,0	760,0	204,0	100,0	860,8				131,0	3,9	33,5	5,1
Semana27	TF1_18	0,0108	2230,0	8,3	23,4	590,0	780,0	192,0	185,0	1037,0				146,0	7,2	40,3	5,7
Semana28	TF1_18	0,0108	2310,0	8,2	23,1	640,0	790,0	204,0	192,5	779,2				306,0	7,5	30,3	11,9

Fuente: El Autor

Para el desarrollo de este objetivo se buscó evaluar y comparar el impacto de ambos sistemas o conformaciones sobre el porcentaje (%) de remoción del DBO₅, DQO y los SST en el agua residual tratada.

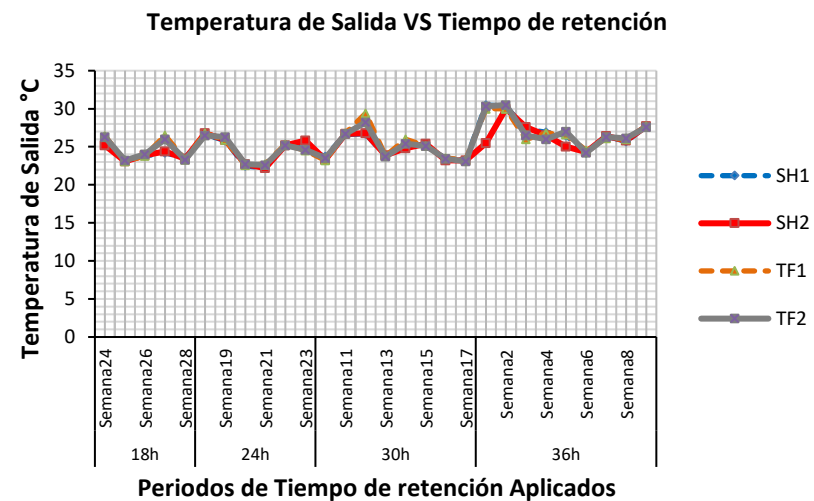
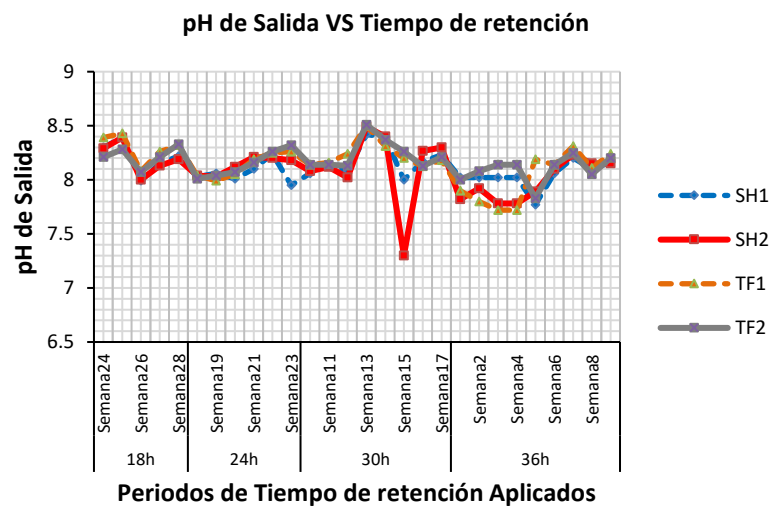
El siguiente análisis de la información obtenida y parcialmente mostrada en la tabla anterior se desarrolló a fin de dar respuesta tanto para los resultados del objetivo 2 como del objetivo 3 planteados.

8.2.1 Análisis estadístico de variables respuesta % remoción (DBO₅, DQO Y SST) y variables de salida (pH, temperatura, conductividad).

Se muestra un análisis inicial general con gráficos de tendencias siguiendo con un análisis descriptivo para las variables respuesta de % de remoción y luego se desarrolla la aplicación de las técnicas de análisis de varianza (ANOVA) tanto unifactorial como multifactorial, que permitió comparar el comportamiento de las configuraciones frente a su desempeño con los % de remoción.

8.2.1.1 Análisis y gráficos de tendencias

De manera general se muestra el comportamiento de algunas variables de campo consideradas relevantes en conjunto con las tres variables respuestas escogidas graficando para cada configuración o reactor las variables de interés vs los periodos correspondientes de TRH aplicados. Para demostrar que los tamaños de muestra no es un problema se realizaron las pruebas de homocedasticidad, independencia y de normalidad los cuales los resultados dieron a favor.



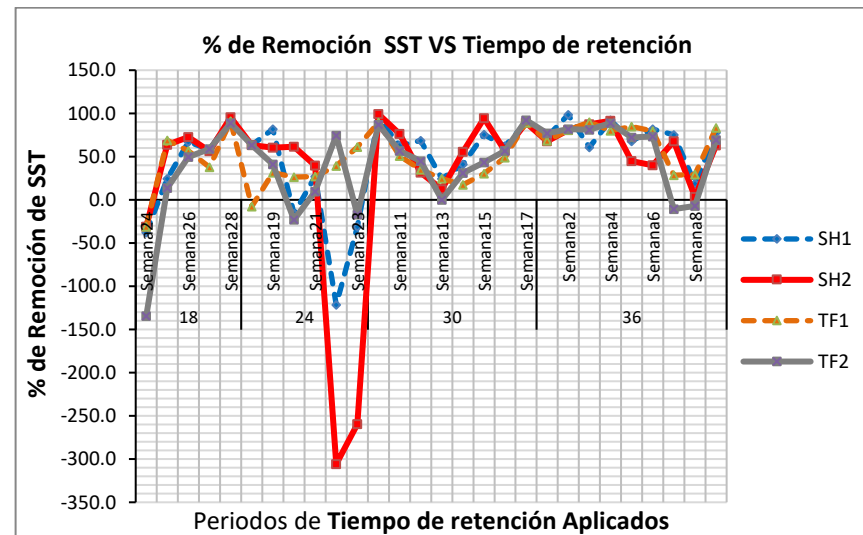
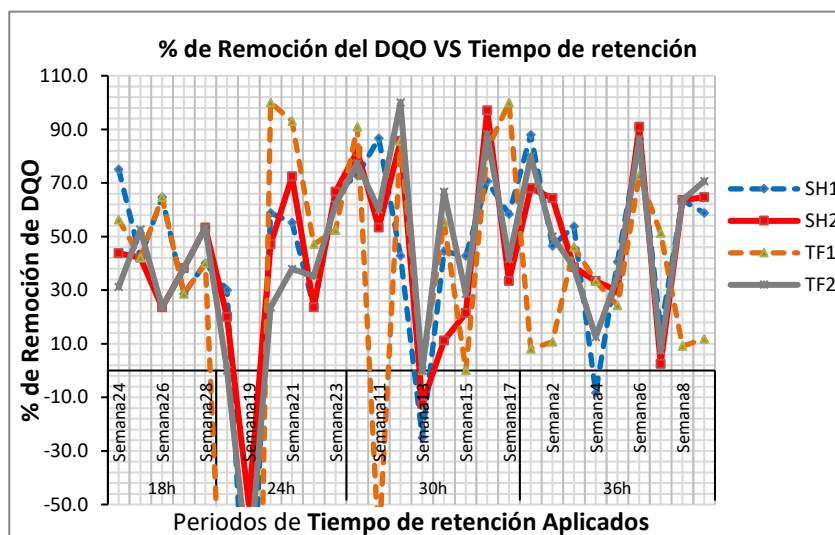
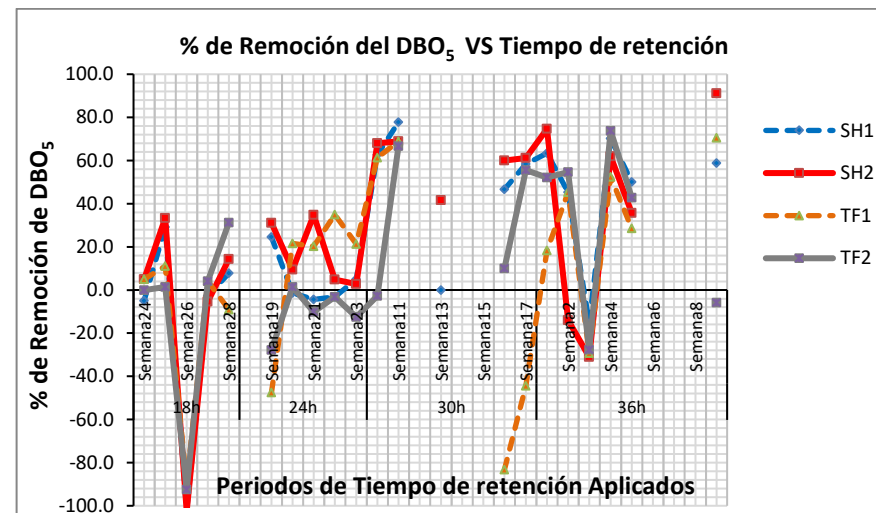
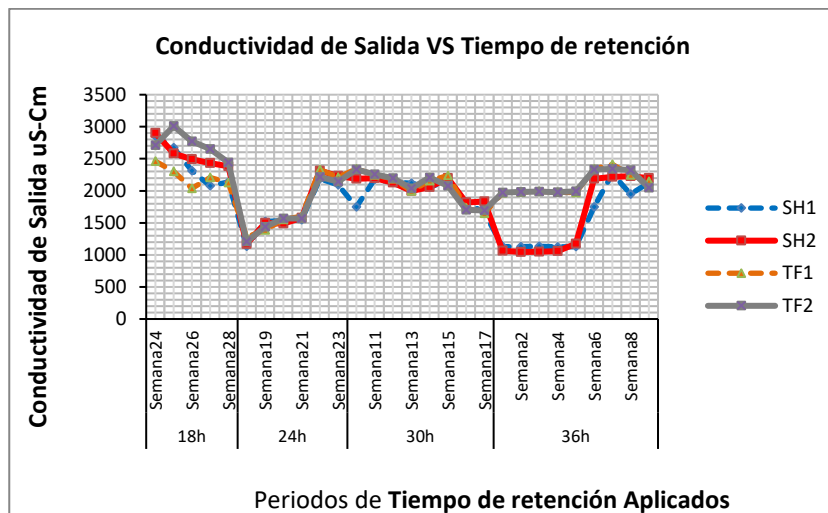


Figura 15. Gráficos de líneas para los valores obtenidos en algunas variables de salida y las variables respuesta, medidas como % de remoción. Fuente Excel

Se evidencia en las gráficas de líneas anteriores que las variables de salida de pH, de temperatura y de conductividad son bastante homogéneas y con alta similitud para cada configuración o sistema a lo largo de los periodos de aplicación de los TRH con algunas excepciones como en el periodo de TRH de 30h en la variable salida de pH, donde se presenta un valor marcadamente bajo correspondiente al sistema SH2; también en la variable conductividad de salida el periodo para TRH 36 h, registra para los SH1 y SH2 los valores más bajos en aproximadamente, la mitad del periodo.

Para las variables % de remoción DBO₅, DQO y SST, es notoria la alta dispersión o amplia fluctuación de todas las variables sobre todo en el % de remoción de DBO₅ y DQO, lo cual no permite vislumbrar con facilidad tendencias definidas o predominios marcados de alguno de los sistemas, de ahí la necesidad de usar técnicas de análisis específicas de comparación, las cuales son propuestas en los siguientes numerales, siendo el ANOVA la técnica que va a separar el error experimental (al azar) de las diferencias reales debidas a los factores en estudio.

8.2.1.2 Resumen de estadísticos descriptivos.

Se muestra a continuación en la **tabla 11**, el resumen de algunos estadísticos descriptivos característicos de los grupos formados por los factores en estudio tanto tomados de manera independiente.

Tabla 11. Estadísticos Descriptivos para factores Tipo de Reactor y Tiempos de Retención Hidráulico, tomados de forma Independiente.

FACTORES	NIVELES	Número de Tratamientos Válidos	%Remoción_DBO ₅						%Remoción_DQO						%Remoción_SST					
			Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	%CV	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	%CV	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	%CV
Tipo de Reactor (TanqueFiltro o SistemaHíbrido)	TF1	21	-15,0	18,3	70,6	-475,0	114,7	764,9	24,1	44,2	100,0	-325,0	85,3	353,9	50,4	49,9	91,2	-31,0	31,7	62,9
	SH1	21	22,2	24,6	77,8	-102,5	41,6	187,6	42,8	50,2	88,0	-125,0	42,2	98,6	49,1	65,2	98,5	-121,6	49,7	101,3
	TF2	21	-19,3	1,4	73,8	-616,7	142,2	737,1	42,5	40,1	100,0	-75,0	35,2	82,9	41,5	56,6	92,3	-134,5	49,4	119,0
	SH2	21	26,0	33,3	91,2	-102,5	43,9	169,1	43,1	43,0	97,1	-50,0	32,6	75,7	34,9	62,3	99,2	-305,9	94,6	271,2
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	18h	20	-13,2	2,8	33,3	-102,5	44,6	338,5	44,1	42,1	75,0	23,5	14,2	32,1	38,1	57,4	95,4	-134,5	57,6	151,1
	24h	20	5,1	3,8	34,9	-47,5	20,9	409,5	8,3	36,6	100,0	-325,0	94,0	1127,6	-5	29,2	81,9	-305,9	98,1	20052,0
	30h	20	-20,7	57,0	77,8	-616,7	185,9	897,1	49,2	57,0	100,0	-66,7	41,1	83,5	57,2	56,6	99,2	0,0	27,8	48,6
	36h	24	36,1	47,7	91,2	-31,0	37,1	102,8	44,8	46,4	90,9	-8,3	27,7	61,8	65,1	74,3	98,5	-10,7	28,2	43,3

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición de resultados explorar y estadísticos descriptivos

La tabla 11 presenta los estadísticos básicos para las poblaciones formadas por los niveles de los factores tomados de forma independiente. Para las variables respuesta de % de remoción se aprecia de manera general que las dispersiones de los grupos en ambos factores son en general altas, evidenciada esta observación, por los valores de desviaciones estandar y de % de coeficientes de variación (%CV) muy altos; se resalta en verde la desviación estandar de la variable respuesta % de remoción DBO₅ para 24h de TRH, la cual es la mas baja de todas las calculadas.

En particular los promedios de % de remoción DBO_5 **para el factor Tipo de Reactor** son más altos en los dos sistemas híbrido respecto a los sistemas de tanque séptico y filtro convencional; en los promedios de % de remoción de DQO, sólo la configuración TF1 es menor que las otras tres configuraciones $24,1\% < (42,8\%; 42,5\% \text{ y } 43,1\%)$ y en los promedios de % de remoción de SST los valores parecen más similares entre si ($50,4\%; 49,1\%; 41,5\% \text{ y } 34,9\%$), siendo sólo un poco más bajo el promedio del sistema híbrido SH2 . **En cuanto al factor Tiempo de Retención Hidráulica** para los promedios de % de remoción del DBO_5 solo el valor correspondiente a 36h ($36,1\%$), es claramente más alto que los demás; para los promedios de % de remoción del DQO y SST los valores correspondientes a 18h, 30h y 36h, son notoriamente más altos que el promedio del % de remoción correspondiente a 24h. Se resaltan en verde los promedios de % de remoción notoriamente más altos dentro de su mismo grupo discriminado por los niveles de un mismo factor.

8.2.1.3 Análisis de varianza

Para la aplicación de técnicas anova se realizaron de manera preliminar las pruebas estadísticas para la normalidad homogeneidad de varianzas e independencia de los grupos de observaciones formados por los niveles de los factores en estudio; para luego proceder a efectuar la comparación de promedios por cada factor en estudio y posteriormente el análisis de los dos factores su interacción y el efecto de la covariable mediante un modelo multifactorial.

Los resultados de la validación de supuestos, se muestra en el anexo B.

Mediante la interpretación de los resultados de los supuestos se concluye que la normalidad y la homocedasticidad no se cumple en algunos casos, sin embargo, el supuesto de independencia si se cumple en la gran mayoría de los casos con lo cual se puede proceder a efectuar el analisis ANOVA. Sin embargo se debe srer cuidadoso en la interpretación de los resultados aunque estas técnicas ANOVA poseen robustez frente al incumplimiento de la normalidad y la homocedasticidad.

8.2.1.4 Análisis de varianza unifactorial

Tabla 12. Estadísticos F y P-Valores para comparación de promedios de % de remoción entre niveles de factores.

FACTORES	NIVELES	Número de Tratamientos válidos	%Remoción_DBO ₅		% Remoción_DQO		% Remoción_SST	
			Estadístico F	P-Valor	Estadístico F	P-Valor	Estadístico F	P-Valor
Tipo de Reactor: (TanqueFiltro o SistemaHíbrido)	TF1	21	1,30	0,281	0,86	0,463	0,4	0,761
	SH1	21						
	TF2	21						
	SH2	21						
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	18h	20	1,556	0,206	3,462	0,019	7,475	0,000
	24h	20						
	30h	20						
	36h	24						

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición comparación de medias. ANOVA de un factor.

La tabla 12 muestran los P-valores de las comparaciones entre los promedios de % de remoción para los cuatro niveles de tipo de reactor y para los cuatro niveles de tiempo de retención hidráulica aplicado respectivamente. Se utiliza el estadístico F de Fisher para dilucidar la igualdad o no de promedios en variables respuesta entre grupos.

El análisis de los P-valores proporciona la interpretación de si se acepta o no la hipótesis nula de igualdad de promedios. De esta manera se puede determinar que sólo para el % de remoción de DQO y SST en el grupo de niveles del TRH existen P-valores valores < 0,05; por lo cual no se acepta la hipótesis H₀ o de igualdad de medias entre los niveles del este factor; es decir el análisis ANOVA indica que hay diferencias entre las eficiencias de % remoción de DQO y SST debidas a los TRH aplicados; mientras que para el grupo de tipos de reactores la prueba no presenta evidencias de que haya diferencias significativas entre los promedios de los % de remoción de las tres variables respuesta.

Se complementa el análisis unifactorial de la varianza mediante los gráficos de las figuras 16 y 17, usando los diagramas denominados barras de error que contienen los promedios de % remoción con intervalos del 95 % de confianza para el efecto los dos factores en estudio.

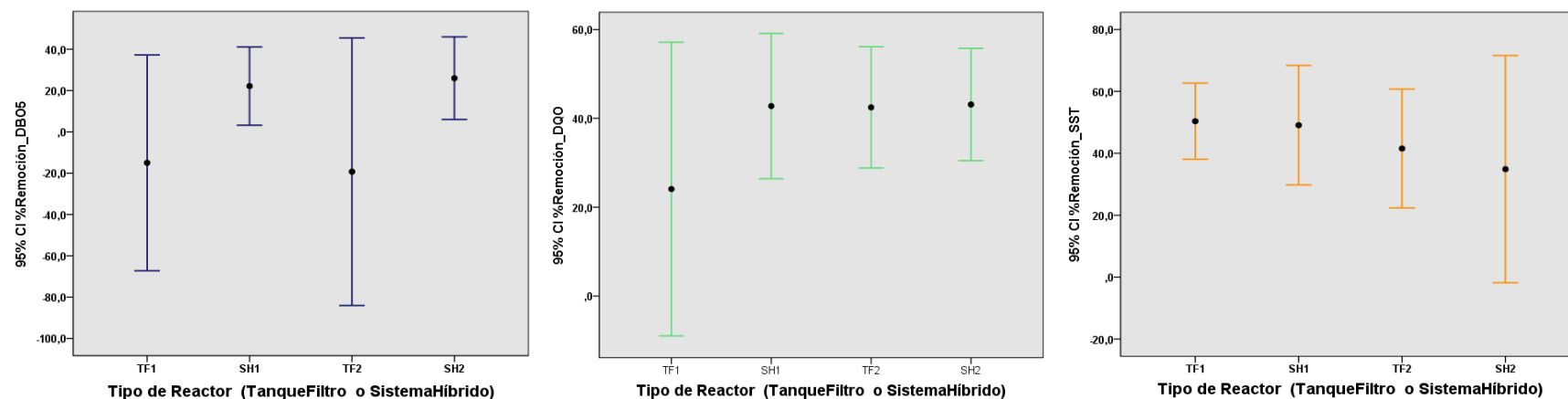


Figura 16. Diagramas de Barras de Error con Intervalo de confianza para la media del 95% en las tres variables respuesta, usando el Factor Tipo de Reactor. Fuente SPSS

De acuerdo a la figura 16 se observa que en todos los casos los % de remoción de las tres variables según el tipo de configuración del reactor, los intervalos de confianza poseen trayectos comunes (se traslapan) y no hay una clara diferencia entre ellos. Lo anterior es congruente con el resultado de los p-valores de la tabla 12 que indicaban el cumplimiento de la hipótesis nula, es decir a favor de que no hay diferencias entre los intervalos que contienen los valores promedio de % de remoción. Sin embargo para la DBO₅ se resalta que los dos sistemas híbridos poseen distribuciones en sus intervalos de confianza más cortas que los TF lo que indicaría una mayor probabilidad en estos dos sistemas (SH1 y SH2), de encontrar mayor cantidad de valores de % de remoción de DBO₅ positivos y por lo tanto valores de % de eficiencia de remoción aceptables de acuerdo a lo esperado para estos sistemas.

Para los % de remoción de DQO y SST en los sistemas TF1 y SH2 respectivamente poseen intervalos de confianza, mucho mas grandes que los otras tres configuraciones lo que hace aumentar la probabilidad de que para estas dos variables y en estas dos configuraciones (TF1 y SH2) aparezcan valores muy bajos o negativos, lo que disminuye la confiabilidad de asegurar al menos valores moderados en %de eficiencia de remoción. Esto contrasta con las configuraciones SH1,TF2 YSH2 para el % de remoción de DQO y de las configuraciones TF1,SH1 y TF2 para el % de remoción de SST que entregarían probabilidades mas altas de obtener % de remociones más eficientes y con valores por encima de al menos el 20%.

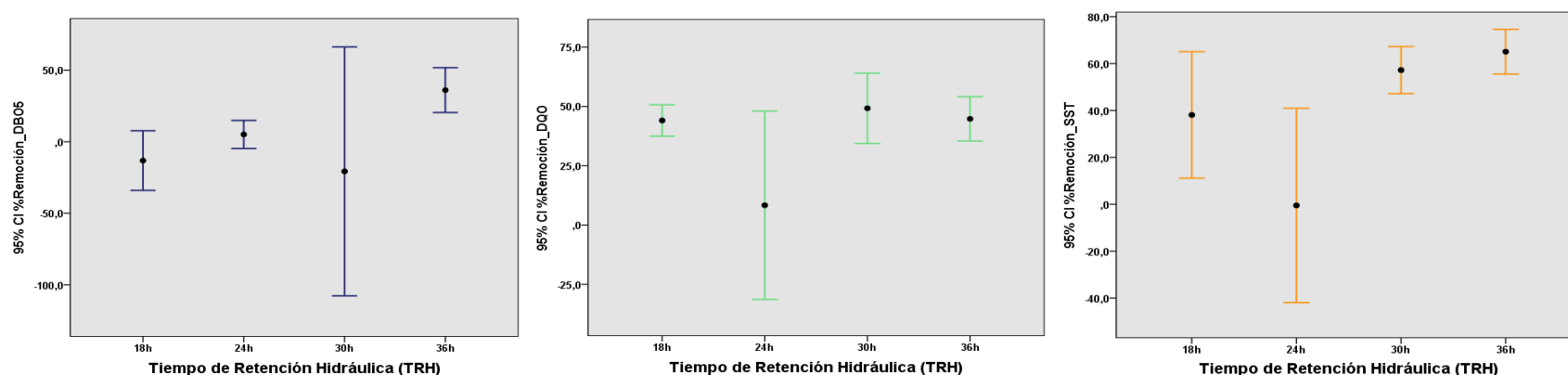


Figura 17. Diagramas de Barras de Error con Intervalo de confianza para la media del 95% en las tres variables respuesta, usando el factor Tiempo de retención Hidráulica (TRH). Fuente SPSS

En la figura 17 que confronta el comportamiento de las tres variables de respuesta respecto de los TRH aplicados; es mucho más notable las diferencias entre algunos promedios de % de remoción entre los TRH aplicados; es así como para el porcentaje (%) de remoción de DBO₅ el promedio para el nivel de 36h, es más alto que para los tiempos 18h y 24 h; sin embargo, esta diferencia entre los promedios

e intervalos de confianza del % de remoción de DBO₅ para el tiempo 36h, frente a 18h y 24h, está en contraposición al test ANOVA, que indicaba igualdad de medias.

Para el promedio del % de remoción de DQO los promedios e intervalos de confianza de los tiempos de 18h, 30h y 36 h son superiores al porcentaje (%) de remoción DQO de 24h, y mucho más cortos en longitud de intervalos lo que a su vez aseguraría una mejor probabilidad para estos tres tiempos de mantener un % de remoción de DQO en zonas muy aceptables de eficiencias.

Para los porcentajes (%) de remoción de SST los valores correspondientes a los tiempos aplicados de 30h y 36h son mucho más altos que el TRH de 24h y con intervalos de confianza muy cortos que aseguran efectos a favor de mantener buenas eficiencias de % de remoción.

La aparente discrepancia entre la prueba ANOVA en el caso de los TRH aplicados a la variable % de remoción de DBO₅ y el resultado gráfico utilizando las Barras Error se probó utilizando un ensayo adicional denominado prueba robusta de igualdad de medias de Welch, la cual arrojó un **p-valor de 0,02**, lo cual reafirma el resultado gráfico de la existencia de diferencia entre medias y en este caso a favor del resultado de 36h, frente a 18h y 24h de TRH.

Los resultados en general del análisis ANOVA usando los factores de manera independiente sólo muestran en que existe un factor que produce diferencias significativas en los promedios, el cual es el tiempo de retención hidráulica y que para el tiempo 36h siempre produce los valores más altos en % de remoción de DBO₅, DQO y SST.

Para el SST los tiempos de 30h y para la DQO los tiempos de 30h y 18 h, también producen aceptables promedios de % de remoción y superiores a los demás TRH.

8.2.1.5 Análisis de varianza multifactorial

Como complemento al análisis de resultados del objetivo número 2 se desarrolla el análisis ANOVA para el modelo factorial, donde se considera, el análisis de los dos factores en estudio y la interacción entre ellos.

Este análisis al igual que el ANOVA unifactorial realiza pruebas de comparación con los promedios de las variables de respuesta pero esta vez considera no sólo los grupos formados por cada nivel de los dos factores en estudio sino también los grupos formados por la interacción de segundo orden o combinación entre tipo de reactor y tiempo de retención hidráulico aplicados, para lo cual se utiliza también el estadístico F como estadístico de prueba y los P-valores de este frente a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Se presenta en la siguiente tabla los resultados del análisis factorial de la varianza utilizando el programa estadístico SPSS para el cálculo del coeficiente de determinación R^2 , la suma de cuadrados, el cálculo de las medias cuadráticas, el estadístico F y su correspondiente P-Valor. En el modelo se tiene en cuenta el hecho de que la matriz de datos es desequilibrada (no contiene el mismo número de datos para cada nivel o combinación de niveles) e incompleta (presentando algunas observaciones faltantes).

Tabla 13. Resultados Análisis de Varianza para Modelo Lineal Multifactorial, Nivel de significancia de prueba $\alpha = 0,05$.

Origen de La Variabilidad	%Remoción DBO ₅ . $R^2 = 0,205$.				%Remoción DQO. $R^2 = 0,138$.				%Remoción SST. $R^2 = 0,258$.			
	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia , P-Valor	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia , P-Valor	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia , P-Valor
Modelo	15	10617,5	1,17	0,317	15	2891,5	1,03	0,435	15	6981,7	2,23	0,010
Intersección : (μ)	1	279,1	0,03	0,861	1	142232,2	50,50	0,000	1	169672,3	54,09	0,000
Tipo de Reactor (TF;SH) : (R) _i	3	12884,1	1,42	0,245	3	2293,8	0,81	0,489	3	1702,3	0,54	0,654
Tiempo de Retención Hidráulica, h : (TRH) _j	3	14282,0	1,57	0,204	3	9176,6	3,26	0,025	3	23260,8	7,42	0,000
Tipo de Reactor * Tiempo Retención Hidráulica : ($R \times TRH$) _{ij}	9	8932,8	0,98	0,462	9	944,3	0,34	0,961	9	3399,5	1,08	0,382
Error (ξ) _{ii}	68	9083,9			96	2816,6			96	3136,6		
Total	84				112				112			

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición de resultados Análisis Factorial de la Varianza, Influencia sobre las variables respuesta de los niveles de cada factor y sus Interacciones.

En la tabla 13 se presenta el resumen principal del análisis de varianza para el modelo factorial donde se utilizan los promedios cuadráticos para cada fuente u origen de la probable variabilidad y también los estadísticos F y los correspondientes P-Valores.

En la tabla se aprecia que sólo los P-valores en el **factor tiempo de retención hidráulico**, para las variables % de remoción DQO y % de remoción de SST (0,025 y 0,000) **son < 0,05**; es decir, que para estas dos variables de respuesta el TRH ejerce algún efecto en sus varianzas y por consiguiente produce algunos valores promedios diferentes (hipótesis alterna H_a); sin embargo en cuanto a la adecuación del modelo para explicar la variabilidad de manera general en las variables respuestas los R^2 o coeficientes de determinación (respectivamente 0,138 y 0,258), indican que los modelos no son completamente satisfactorios; pues en el caso del DQO el modelo sólo explicaría el 13,8% de la variabilidad en las respuestas y en el caso de los SST el modelo sólo explicaría el 25,8%.

Para el caso de la variable respuesta % de remoción DBO_5 ningún valor de significancia de los factores ni su interacción, indican influencia en su variabilidad y tanto los dos factores como su interacción poseen P-valores calculados (0,245; 0,204 y 0,462 > 0,05), también el p-valor del modelo de 0,317 y su R^2 de 0,205 indican que no hay una buena adecuación del modelo para explicar satisfactoriamente la varianza generalizada en el % de remoción de DBO_5 .

Basado en los resultados tanto del ANOVA unifactorial como del ANOVA multifactorial se puede observar de manera general que los % de remoción no dependen del tipo de configuración de reactor y sólo dependen del factor TRH; es decir desde la perspectiva del análisis de las configuraciones híbridas estas, no son superiores a las configuraciones convencionales.

8.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBJETIVO 3. DETERMINAR EL EFECTO DEL CAUDAL DEL AFLUENTE, TRADUCIDO COMO CARGA ORGÁNICA, FRENTE A LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO Y COMPARARLO CON LA CONFIGURACIÓN TRADICIONAL

Para el desarrollo de este objetivo se evaluó el impacto del caudal del afluente de ambos sistemas sobre el % de remoción del DBO₅, DQO y los SST en las aguas residuales tratadas; especialmente observando el comportamiento sobre la configuración híbrida. El diseño experimental se llevó a cabo utilizando como factores de ensayo el tiempo de retención hidráulico, como se detalla en las tablas de resultados más adelante y de igual forma se evaluó el efecto de las dos configuraciones de reactores como segundo factor de estudio. Se introdujo el efecto del caudal mediante la inclusión de la carga orgánica como covariable en el nuevo modelo lineal multifactorial; para ello se usó la concentración correspondiente de DBO₅, DQO y SST, calculando las cargas (Caudal x Concentración) en unidades consistentes para obtener Kg/h y estos valores fueron introducidos en el modelo lineal multifactorial usando las respectivas variables respuesta de % de Remoción y corriendo los ANOVA en el programa SPSS.

Tabla 14. Resultados Análisis de Varianza para Modelo Lineal Multifactorial, con efecto de la carga orgánica como covariable. Nivel de significancia de prueba $\alpha = 0,05$.

Origen de La Variabilidad	%Remoción DBO ₅ . R ² = 0,310.				%Remoción DQO. R ² = 0,398.				%Remoción SST. R ² = 0,264.			
	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia, P-Valor	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia, P-Valor	Grados de Libertad gl	Media cuadrática	Estadístico F	Significancia, P-Valor
Modelo	16	15076,8	1,89	0,037	16	7803,9	3,92	0,000	16	6695,0	2,13	0,013
Intersección: (μ)	1	73522,8	9,19	0,003	1	20106,8	10,11	0,002	1	139942,1	44,51	0,000
Carga Orgánica Afluente (DBO ₅ , DQO o SST)_Kg/h (X_{ijk})	1	81965,5	10,25	0,002	1	81490,2	40,98	0,000	1	2394,9	0,76	0,385
Tipo de Reactor (TF,SH): (R) _i	3	12884,1	1,61	0,195	3	2293,8	1,15	0,332	3	1702,3	0,54	0,655
Tiempo de Retención Hidráulica, h: (TRH) _j	3	39782,0	4,98	0,004	3	23352,0	11,74	0,000	3	20501,8	6,52	0,000
Tipo de Reactor \times Tiempo Retención Hidráulica: ($R \times TRH$) _{ij}	9	8932,8	1,12	0,363	9	944,3	0,47	0,888	9	3399,5	1,08	0,384
Error (ξ_{ijk})	67	7996,2			95	1988,4			95	3144,4		
Total	84				112				112			

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición de resultados Análisis Factorial de la Varianza, Influencia sobre las variables respuesta de los niveles de cada factor y sus Interacciones, con introducción de la covariable carga orgánica.

La tabla 14 muestra el análisis factorial de la varianza, introduciendo el efecto de la covariable en el modelo; se resaltan en color verde claro, los P-valores significativos.

En este caso es notable que las fuentes de variabilidad como son el modelo, intersección, tiempo de retención hidráulico y la carga orgánica, ejercen efecto significativo sobre las variables respuesta (sus P-valores $< 0,05$), exceptuado el efecto no significativo de la carga orgánica medida como SST sobre la variable respuesta % de remoción SST (P-Valor $0,385 > 0,05$). La interacción de los dos factores como en el caso de la tabla 10 (modelo sin covariable), no es significativa en la variabilidad de las respuestas.

Los coeficientes de determinación o R^2 aumentan significativamente en comparación del modelo sin covariable expuesto en la tabla 9 y específicamente para el caso del % de remoción de DBO_5 y del DQO, y mejoran la adecuación del modelo en la explicación de la variabilidad de estos % de remoción.

En relación con la variable respuesta % de remoción de SST, aunque el P-valor del modelo sigue mostrando un valor significativo, su R^2 no mejora sustancialmente comparado con el análisis de la tabla 8 ($0,258$ similar a $0,264$). También para esta variable de respuesta, si bien el TRH sigue mostrando que produce un efecto en la variabilidad de la respuesta y produce al menos un par de promedios diferentes la carga orgánica no ejerce ningún efecto como ya se había indicado.

También como en el modelo factorial sin covariable no hay efecto significativo en ninguna de las tres variables de respuesta debida al tipo de configuración o reactor.

Los siguientes gráficos de perfiles permiten comparar las medias marginales de los % de remoción resultantes del modelo factorial para cada tipo de configuración de reactor dentro de los diferentes tiempos de retención aplicados. Se muestran parejas de gráficos de análisis factorial sin inclusión y con inclusión de covariable y para la misma variable de respuesta.

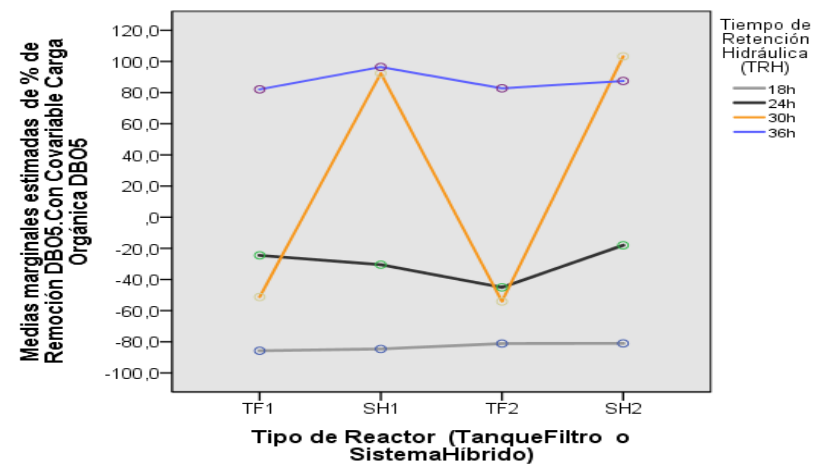
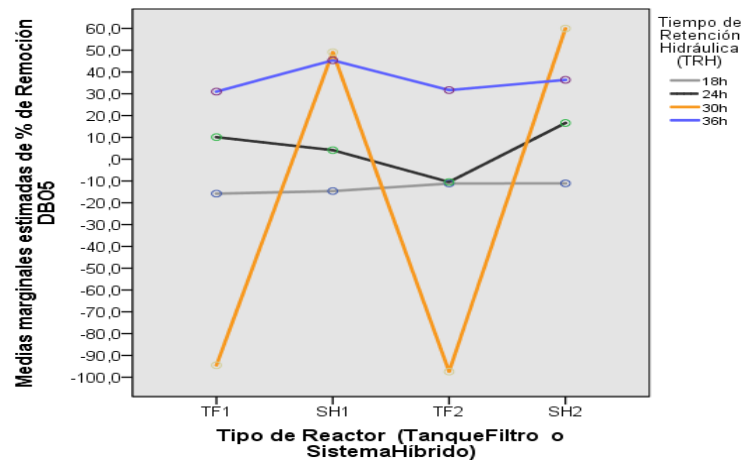


Figura 18. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de remoción de DBO₅ VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica, con inclusión y sin inclusión de covariable. Fuente SPS

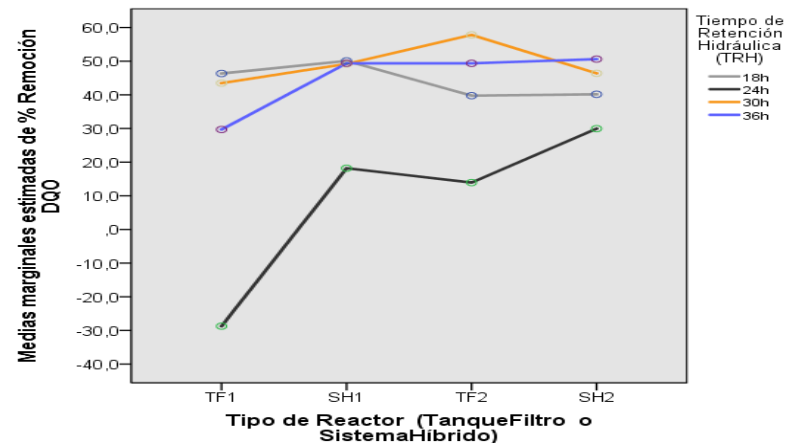
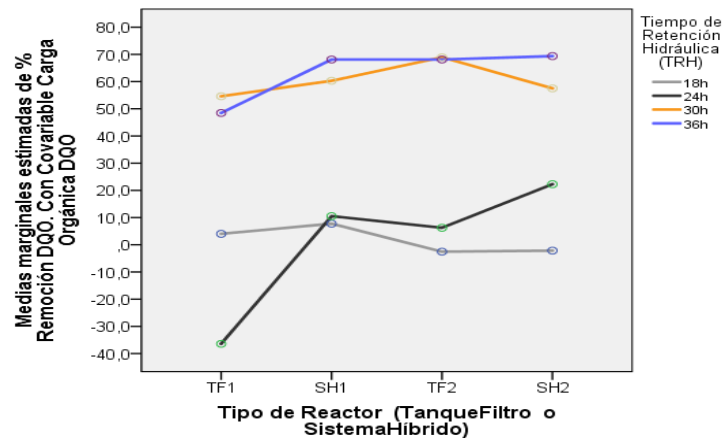


Figura 19. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de Remoción de DQO VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica. Fuente SPSS

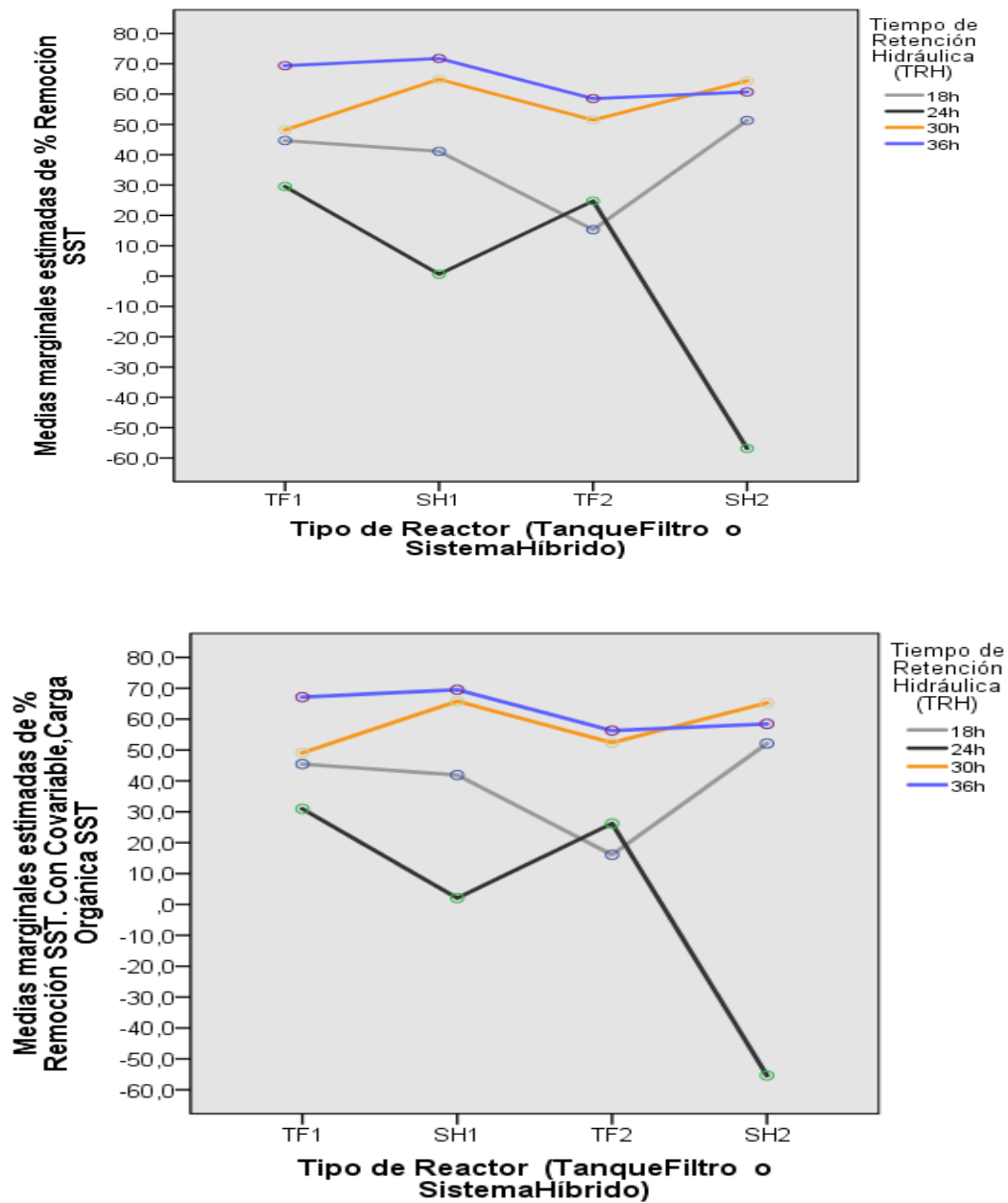


Figura 20. Gráficos de perfil para las medias marginales de los % de Remoción de SST VS Tipo Reactor- Tiempos de Retención Hidráulica. Fuente SPSS

Los gráficos de la figura 18 presentan el comportamiento de los % de remoción de DBO₅ sin covariable y con covariable en las cuatro configuraciones de reactores y para cada uno de los tiempos de retención hidráulico aplicados. Los comportamientos son similares en tendencias y forma de los gráficos y en general, los promedios de % de remoción de DBO₅ se ordenan en magnitud de mayor a menor con las líneas de 36 h > 24 h > 18 h pero la línea de tiempos de retención de 30 h presenta cambios bruscos en los promedios siendo más altos en los sistemas híbridos que en los sistemas tradicionales de tanque y filtro, por lo que no muestran una tendencia definida o uniforme respecto a los cuatro reactores para este TRH de 30 h en particular; sin embargo y a pesar de estas observaciones los resultados de valores de significancia de la tabla 8 no validan en el % de remoción de DBO₅ un efecto significativo del factor TRH. El gráfico contiguo que presenta el efecto de la covariable carga orgánica como DBO₅ discrimina y separa de una manera más amplia las líneas de TRH manteniendo el orden 36 h > 24 h > 18 h en las cuatro configuraciones, pero esta vez la línea de 36h muestra valores de promedios de % de remoción mucho más altos que los demás TRH y que los correspondientes en el gráfico sin covariable al igual que la línea de 30h y también muestra promedios de % de remoción más altos. Estas observaciones complementan los resultados de la tabla 9, donde el modelo factorial con covariable si daba validez al efecto del factor TRH y al efecto de la covariable.

La figura 19 muestra el comportamiento de los promedios del % de remoción DQO, frente al tipo de reactor y los tiempos de retención hidráulico sin y con covariable.

Para el primer gráfico de la figura 20, las líneas de 36 h, 30 h y 18 h se mantienen por encima de la línea TRH de 24h, es decir con promedios mayores en concordancia con los resultados del modelo factorial que dio validez al efecto del TRH sobre las remociones y por lo tanto indicaba alguna diferencia entre los % de remoción respectivos debidos al tiempo de retención aplicado. En el segundo gráfico de la figura 6 nuevamente el efecto de la introducción de la covariable como en el DBO₅ es producir una mejor separación esta vez entre las líneas de TRH de 36h y 30h frente a 24h y 18h, manteniéndose muy por encima los promedios de % de remoción de 36h y 30h y al igual que en la figura sin efecto de covariable,

los % de remoción se mantienen en magnitudes muy aceptables desde el punto de vista de la eficiencia de remoción esperada.

Para la figura 20 los gráficos de % de remoción de SST, como era de esperarse según los resultados de los valores de significancia y valores de R^2 o coeficientes de determinación del modelo factorial sin y con covariable, indican que, evidentemente no hay diferencias entre las formas de las gráficas y por tanto la carga orgánica medida como SST, no tiene ningún efecto en mejorar el poder explicativo del modelo sobre la variabilidad del % de remoción como SST; sin embargo si es claro que el factor TRH ejerce un efecto y en general los TRH de 36h y 30h se mantienen por encima de los comportamientos de los otros dos TRH en las cuatro configuraciones de reactores.

De manera general y observando los gráficos de perfil la inclusión de la carga orgánica como covariable permite visualizar el % de remoción en aumento comparados frente al modelo donde no se incluye el efecto de la covariable y este aumento de manera general está en el mismo sentido como aumentan los TRH (caudales bajos, cargas bajas); sin embargo, esta tendencia no discrimina los sistemas híbridos de los convencionales.

Finalmente se complementaron los anteriores análisis ANOVA, con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para comparación de rangos promedios de las variables respuestas tanto por tipo de reactor, como por niveles de tiempos de retención hidráulica aplicados, los resultados se muestran en el Anexo C.

9 CONCLUSIONES

El reactor híbrido que comprende tanque séptico y filtro anaerobio responde al mejor tratamiento de 30 h con % de remoción de 64.8% DQO, 51.9 % DBO5 y 60 % SST

La configuración híbrida (SH), presentó un desempeño similar al convencional (TF) en serie con respecto al % de remoción de 60 % DQO y 51 % DBO5 y comparándolo con el sistema convencional con remociones de 53.45% DQO y 39.3% DBO5, lo que concluye que es viable implementar nuevas estrategias tecnológicas como lo es el sistema híbrido en el tratamiento In Situ de ARD, disminuyendo espacio y operación del sistema híbrido, viéndose finalmente reflejado en disminución de costos.

La covariable caudal, representada en diferentes TRH es incidente en las variaciones de los promedios de % de remoción siendo de manera general el tiempo de retención de 36h, el más determinante en los mayores % de remoción de las tres variables respuesta y los tiempos de 36h y 30h los mejores, para las mayores eficiencias de remoción de las variables % de remoción DQO y SST.

Se diseñó un sistema híbrido utilizando parámetros conocidos como caudal medio, número de usuarios y algunos otros parámetros como los tiempos de retención, fueron estimados basado en información bibliográfica que se documentó en la presente investigación. De igual manera algunos cálculos se debieron hacer de manera iterativa para ajustar dimensiones como largos, altos y anchos de secciones a los volúmenes teóricos obtenidos.

Estadísticamente los grupos comparados y discriminados por los niveles y/o interacciones de los factores fueron en general heterocedásticos (varianzas diferentes), además de manejarse una matriz de información desbalanceada e incompleta por lo cual se sugiere para futuras investigaciones ajustar y mejorar probablemente el control de los factores en estudio y con ello confirmar las conclusiones de la investigación presente.

No hay evidencia estadística de acuerdo a las pruebas ANOVA y a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, de que haya una diferencia en general para las tres variables respuesta a favor y superior en el desempeño de los dos sistemas híbridos, frente a los sistemas convencionales excepto para la variable % de remoción de DBO_5 , donde al comparar mediante intervalos de confianza de la media de remoción los dos sistemas híbridos tienen distribuciones similares y mucho más cortas que la pareja de sistemas tanque y filtro y con probabilidades más altas de producir mejores eficiencias de remoción.

Las pruebas estadísticas siempre indicaron que el factor Tipo de Reactor no era relevante ni producía en general un efecto significativo sobre las eficiencias de remoción.

El factor Tiempo de Retención Hidráulico es el factor incidente en las variaciones de los promedios de % de remoción siendo de manera general el tiempo de retención de 36h, el más determinante en los mayores % de remoción de las tres variables respuesta y los tiempos de 36h y 30h los mejores, para las mayores eficiencias de remoción de las variables % de remoción DQO y SST.

La hipótesis de investigación planteada respecto al mejor desempeño de los sistemas híbridos frente a los sistemas convencionales en la medida que la carga orgánica disminuye, no se puede comprobar de manera contundente, puesto que si bien a mayores TRH (menores cargas orgánicas) se pudo obtener mayores % de remoción en general en las tres variables, este efecto no es suficientemente diferenciado para las cuatro configuraciones y en general las cuatro configuraciones mejoraban para TRHs más altos esto se pudo comprobar con los análisis de los gráficos de perfil de los modelos factoriales.

La inclusión del estudio del efecto del caudal, a través de la consideración de la carga orgánica como covariable en el modelo factorial discrimina mejor el efecto de los tiempos de retención hidráulico; lo que significa que esta variable si tiene un efecto en el aumento de los % de remoción para los TRH más altos 36h y 30h.

10 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una investigación de este sistema híbrido a escala de laboratorio teniendo control de la carga contaminante del efluente para obtener una mejor respuesta en cuanto al diseño.

Se recomienda hacer una comparación de costos operacionales, de diseño y construcción del sistema híbrido y analizarlo frente al convencional.

En investigaciones futuras, se recomienda realizar monitoreo de la calidad del lodo de los reactores durante la operación y al final, con el fin de determinar aspectos tales como la composición de la biomasa y la actividad metanogénica específica, los cuales están directamente relacionados con el aumento de la eficiencia de remoción de materia orgánica de los sistemas.

Teniendo en cuenta que la digestión del tanque séptico y la del filtro anaerobio se encuentran en una sola unidad, la producción de metano podría ser alta, por lo que se recomienda un estudio de producción de este gas y revisar su aprovechamiento.

Se recomienda estudiar detalladamente qué forma de mantenimiento se puede implementar para este híbrido teniendo en cuenta que consta de una sola unidad y puede generar una pérdida total de su estabilización.

Referencias

Adhikari, J., & Lohani, S. (2019). "Design, installation, operation and experimentation of septic tank e UASB wastewater treatment system".

Álvarez, A., Herrera, L., Colomer, F., Gallardo, A., Alberola, M., y Gomez, M. (2012). Codigestión de biorresiduos para su biometanización. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Valencia, 11-13 de julio.

Anil, R. y Neera, A. (2016). Modified septic tank treatment system. Procedia technology. Volume 24, pages 240 – 247.

Araujo, D. J., Rocha, S. M. S., Cammarota, M. C., Xavier, A. M. F., & Cardoso, V. L. (2008). Anaerobic Treatment Of Wastewater From The Household And Personal Products Industry In A Hybrid Bioreactor.

Arias Henao, M. (2018). "Evaluación Del Desempeño De Las Tecnologías Tanque Séptico - Filtro Anaerobio Tipo Convencional E Híbrido Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas" (Magister En Ingeniería - Énfasis En Ingeniería Sanitaria Y Ambiental). Universidad Del Valle.

Butler, D. y Payne, J. (1995). "Septic Tanks: Problems and Practice " Building and Environment 30 (3): 419-425.

Castaño, M. (2003). Influencia del medio de soporte en el comportamiento de filtros anaerobios de flujo ascendente bajo diferentes tiempos de retención hidráulica. Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle.

Castaño, M. y Paredes, D. (2002). Uso de aros de guadua en filtro anaeróbios para el tratamiento de aguas residuales. Seminario -Taller Avances en la Investigación Sobre Guadua. Pereira: 1-6.

Chernicharo, C. A. (2013). Reactores Anaerobios. Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. 5.

Donoso-Bravo, A., J. Mailier, C. Martin, J. Rodríguez, C. A. Aceves-Lara y V. W. A. (2011). "Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review". *Water Research*. 45. : 5347-5364.

Elmitwalli, T. A., L. T. Oahn, G. Zeeman and G. Lettinga (2002). "Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/anaerobic hybrid system at low temperature." *Water Research* 36: 2225-2232.

García, I., Betancort, J., Salas, J., Peñate, B., Pidre, J., Sardón, N. (2006). Guía sobre tratamiento de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Instituto Tecnológico de Canarias, España, pp 11.

Gerardi, M. (2003). The microbiology of anaerobic digesters. *John Wiley & Sons*.

Giraldo Jaramillo, Y. A. (2020). "Propuesta de tratamiento para el agua residual generada en la empresa soluciones nutritivas. Universidad Autónoma del Occidente".

Hongliang, W., Shikun, Z., Bo, Q., Yu, Z., & Bin, F. (2017). "Anaerobic treatment of source-separated domestic bio-wastes with an improved upflow solid reactor at a short HRT".

J Adhikari, S Lohani, (2019). "Design, installation, operation and experimentation of septic tank – UASB wastewater treatment system".

Jiménez García, D. M. (2016). "Valoración de remoción de materia orgánica en planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de un pequeño centro poblado, mediante adición de lodos aluminosos como alternativa de aprovechamiento sostenible de este residuo". (Magister en Ecotecnología). Universidad Tecnológica de Pereira.

Kassab, G., M. Halalsheh, A. Klapwijk, M. Fayyad y J. B. Van Lier (2010). "Sequential anaerobic–aerobic treatment for domestic wastewater – A review." *Bioresource Technology* 101: 3299-3310.

Luostarinen, S. A. y J. A. Rintala (2005). "Anaerobic on-site treatment of black water and dairy parlour wastewater in UASB-septic tanks at low temperatures." *Water Research* 39: 436-448.

Meena Kumari, S., Anwar, K., & Absar Ahmad, K. (2014). "Modified septic tank-anaerobic filter unit as a twostage onsite domestic wastewater treatment system".

Mendes Predolin, L. (2015). "#Estudio De Un Sistema Híbrido Uasb+Mbr Para El Tratamiento De Aguas Residuales Urbanas" (Máster Universitario En Gestión Sostenible Y Tecnologías Del Agua). Instituto Tecnológico De Costa Rica.

Mukes, D. y A. Kumar (2005). "Treatment of Municipal Waste". In *Biotreatment of Industrial Effluents*, Chapter 27, Butterworth-Heinemann, Burlington: 275-283.

OPS, O. P. d. l. S. (2003). Especificaciones técnicas para el diseño de tanques sépticos. U. d. a. t. p. e. s. b. d. á. rural. Lima, Perú.

Oyanedel, V., Garrido, J. y Méndez, R. (2003). "Nuevos reactores híbridos para el tratamiento de aguas residuales". *Ingeniería Química*: 171-178.

Pang, L., Close, M., Goltz, L., Sinton, H., Davies, C., Hall y Stanton, G. (2004). "Estimation of septic tank setback distances based on transport of E. coli and F-RNA phages." *Environment International*. 29: 907-921.

Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cardenas, L., Vasquez, C. y Torres, W. (2014). Effect of substrate-inoculum ratio on the biochemical methane potential of municipal biowastes. *Ingenieria, Investigacion y Tecnologia*, 16(4), 515-526.

Pérez, A., Torres, P. y Pizarro, C. (2006). Arranque de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca: influencia del inóculo. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR, Universidad del Valle, Colombia.

Perez Vidal, A., Torres Lozada, P., & Silva Leal, J. (2009). "Anaerobic Treatment Of Cassava Starch Extraction Wastewater. Optimization Of Environmental And Operational Variables"

Pérez, Y. y Villegas, O. (2004). "Diseño teórico de un reactor híbrido mediante sistemas no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, México, D.F. pp 37.

Quintero, M. y Rondon, Y. (2012). Estudio preliminar de la producción de biogas a partir de la digestión anaerobia del micilago del café utilizando lodo estiercol de cerdo como inóculo. Universidad de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga.

Ruiz, I., Álvarez, J. y Soto, M. (2001). "El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica." Universidade da Coruña. Facultade de Ciencias. Campus da Zapateira 1-11.

Sabry, T. (2010). "Evaluation of decentralized treatment of sewage employing Upflow Septic Tank/Baffled Reactor (USBR) in developing countries." Journal of Hazardous Materials 174: 500-505

Salazar, L., Uribe, L y Gómez, L. (2019) "Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant"

Sánchez Martínez, R. A. (2015). “Gestión de las aguas residuales de queseras artesanales utilizando producción más limpia y Tratamiento Anaerobio Con Rapa-Fafa. El Caso De Santa Cruz De Turrialba, Costa Rica”. Instituto Tecnológico De Costa Rica.

Sharma, M. K., A. Khursheed and A. A. Kazmi (2014). "Modified septic tank-anaerobic filter unit as a two-stage onsite domestic wastewater treatment system." *Environmental Technology*. 35(17): 2183-2193.

Soroa del Campo, S., Lopetegui Garnika, J., Almandoz Peraita, A., & García de las Huertas, J. (2005). “Diseño de reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales”.

Sousa V.P. & Chernicharo, C.A.L.(2005). Sistema compacto de tratamento de esgotos domiciliares composto de tanque séptico modificado e reatores anaeróbios híbridos operando em série. In: Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande. ABES.

Sunil P., L., Sanjay N., K., & Rune, B. (2020). “A simple anaerobic and filtration combined system for domestic wastewater treatment”.

Torres, P., Rodríguez, J. y Uribe, I. (2003). "Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: Influencia del medio de soporte." *Scientia et Technica Año IX*. UTP 23: 75-80.

Van Haandel, A., M. Kato, P. Cavalcanti y Florencio, L. (2006). "Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater." *Environmental Science and Bio/Technology*: 21-38.

Vargas Pinilla, A. N., & Martínez Martínez, Y. D. B. (2013). “Tratamiento Biológico De Aguas Residuales Generadas En La Universidad Libre Sede Bosque Popular Por Medio

Del Sistema De Reactor Anaerobio De Flujo Ascendente Uasb A Escala Piloto”.
Universidad Libre.

Withers, P. J. A., L. May, H. P. Jarvie, P. Jordan, D. Doody, R. H. Foy, M. Bechmann, S. Cooksley, R. Dils and N. Deal (2012). "Nutrient emissions to water from septic tank systems in rural catchments: Uncertainties and implications for policy." *Environmental Science & Policy*. 24: 71-82.

ANEXOS.

ANEXO A.

Tabla A.1 Resultados Obtenidos Variables de Entrada Sistemas de Tratamiento de ARD.

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISCOQUIMICAS MEDIDAS A LAS ENTRADAS (AFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO															
		Caudal L/S	Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles : AGV mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ -L	Nitritos mgNO ₂ -L	SST mg/L	Carga Orgánica DBO ₅ Kg/h	Carga Orgánica DQO Kg/h	Carga Orgánica SST Kg/h
Semana1	SH1_36	0,0054	2033,0	7,8	30,0	300,0	305,0	340,0	177,5	1333,3	4,8	1,8	0,1	6884,0	3,5	25,9	133,8
Semana2	SH1_36	0,0054	2030,0	7,9	25,0	285,0	405,0	330,0	160,0	718,0	5,0	1,6	0,2	1210,0	3,1	14,0	23,5
Semana3	SH1_36	0,0054	2130,0	7,5	26,6	600,0	765,0	360,0	145,0	693,3	36,8	2,0	0,4	297,0	2,8	13,5	5,8
Semana4	SH1_36	0,0054	2200,0	7,5	25,6	630,0	730,0	240,0	42,0	564,7	26,4	3,8	0,4	290,0	0,8	11,0	5,6
Semana5	SH1_36	0,0054	2063,0	7,2	26,0	490,0	580,0	300,0	21,0	913,6	99,5	2,5	0,2	65,0	0,4	17,8	1,3
Semana6	SH1_36	0,0054	2540,0	7,7	24,4	420,0	520,0	192,0	0,0	1100,0	119,0	2,3	0,3	264,0	0,0	21,4	5,1
Semana7	SH1_36	0,0054	1469,0	7,5	26,0	450,0	500,0	180,0	0,0	820,5		2,1	0,2	56,0	0,0	16,0	1,1
Semana8	SH1_36	0,0054	2380,0	7,4	25,8	640,0	750,0	180,0	0,0	543,2	159,0	1,6	0,2	116,0	0,0	10,6	2,3
Semana9	SH1_36	0,0054	2200,0	8,1	27,5	550,0	660,0	240,0	85,0	839,5				317,0	1,7	16,3	6,2
Semana10	SH1_30	0,0065	2540,0	7,7	23,1	620,0	730,0	84,0	187,5	1113,9	170,0	4,1	0,5	867,0	4,4	26,1	20,3
Semana11	SH1_30	0,0065	2320,0	7,9	26,5	550,0	745,0	84,0	112,5	821,9				223,0	2,6	19,2	5,2
Semana12	SH1_30	0,0065	2290,0	7,8	28,7	600,0	780,0	156,0		383,6	176,0	2,6	0,2	127,0	0,0	9,0	3,0
Semana13	SH1_30	0,0065	2000,0	8,1	23,6	670,0	760,0	84,0	30,0	444,4				57,0	0,7	10,4	1,3
Semana14	SH1_30	0,0065	2140,0	8,1	24,6	590,0	710,0	108,0		480,0	149,0	2,2	0,4	97,0	0,0	11,2	2,3
Semana15	SH1_30	0,0065	2330,0	7,8	25,0	400,0	500,0	96,0		746,7				53,0	0,0	17,5	1,2
Semana16	SH1_30	0,0065	1511,0	8,1	23,7	470,0	530,0	84,0	75,0	1743,6	130,0	2,0	0,5	53,0	1,8	40,8	1,2
Semana17	SH1_30	0,0065	1710,0	8,2	24,7	480,0	610,0	156,0	90,0	615,4				130,0	2,1	14,4	3,0
Semana18	SH1_24	0,0081	1213,0	7,9	25,7	375,0	495,0	144,0		512,8				90,0	0,0	15,0	2,6
Semana19	SH1_24	0,0081	1602,0	7,8	26,6	415,0	605,0	156,0	152,5	207,8				83,0	4,4	6,1	2,4
Semana20	SH1_24	0,0081	1534,0	8,1	22,5	450,0	530,0	144,0	185,0	860,8		1,8		57,0	5,4	25,1	1,7
Semana21	SH1_24	0,0081	1512,0	7,8	22,3	420,0	550,0	120,0	172,5	1487,2				63,0	5,0	43,4	1,8
Semana22	SH1_24	0,0081	2416,0	8,1	24,3	500,0	650,0	120,0	157,5	860,8				51,0	4,6	25,1	1,5
Semana23	SH1_24	0,0081	2322,0	8,2	25,2	630,0	690,0	108,0	199,5	1063,3				77,0	5,8	31,0	2,2
Semana24	SH1_18	0,0108	2238,0	8,3	24,5	530,0	660,0	120,0	152,5	842,1				29,0	5,9	32,7	1,1
Semana25	SH1_18	0,0108	2140,0	8,2	23,1	550,0	700,0	180,0	180,0	950,0				74,0	7,0	36,9	2,9
Semana26	SH1_18	0,0108	2300,0	8,0	23,6	560,0	760,0	204,0	100,0	860,8				131,0	3,9	33,5	5,1
Semana27	SH1_18	0,0108	2230,0	8,3	23,4	590,0	780,0	192,0	185,0	1037,0				146,0	7,2	40,3	5,7
Semana28	SH1_18	0,0108	2310,0	8,2	23,1	640,0	790,0	204,0	192,5	779,2				306,0	7,5	30,3	11,9

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS ENTRADAS (AFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO															
		Caudal L/S	Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles : AGV mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ /L	Nitritos mgNO ₂ /L	SST mg/L	Carga Orgánica DBO ₅ Kg/h	Carga Orgánica DQO Kg/h	Carga Orgánica SST Kg/h
Semana1	TF2_36	0,0054	2033,0	7,8	30,0	300,0	305,0	340,0	177,5	1333,3	4,8	1,8	0,1	6884,0	3,5	25,9	133,8
Semana2	TF2_36	0,0054	2030,0	7,9	25,0	285,0	405,0	330,0	160,0	718,0	5,0	1,6	0,2	1210,0	3,1	14,0	23,5
Semana3	TF2_36	0,0054	2130,0	7,5	26,6	600,0	765,0	360,0	145,0	693,3	36,8	2,0	0,4	297,0	2,8	13,5	5,8
Semana4	TF2_36	0,0054	2200,0	7,5	25,6	630,0	730,0	240,0	42,0	564,7	26,4	3,8	0,4	290,0	0,8	11,0	5,6
Semana5	TF2_36	0,0054	2063,0	7,2	26,0	490,0	580,0	300,0	21,0	913,6	99,5	2,5	0,2	65,0	0,4	17,8	1,3
Semana6	TF2_36	0,0054	2540,0	7,7	24,4	420,0	520,0	192,0	0,0	1100,0	119,0	2,3	0,3	264,0	0,0	21,4	5,1
Semana7	TF2_36	0,0054	1469,0	7,5	26,0	450,0	500,0	180,0	0,0	820,5		2,1	0,2	56,0	0,0	16,0	1,1
Semana8	TF2_36	0,0054	2380,0	7,4	25,8	640,0	750,0	180,0	0,0	543,2	159,0	1,6	0,2	116,0	0,0	10,6	2,3
Semana9	TF2_36	0,0054	2200,0	8,1	27,5	550,0	660,0	240,0	85,0	839,5				317,0	1,7	16,3	6,2
Semana10	TF2_30	0,0065	2540,0	7,7	23,1	620,0	730,0	84,0	187,5	1113,9	170,0	4,1	0,5	867,0	4,4	26,1	20,3
Semana11	TF2_30	0,0065	2320,0	7,9	26,5	550,0	745,0	84,0	112,5	821,9				223,0	2,6	19,2	5,2
Semana12	TF2_30	0,0065	2290,0	7,8	28,7	600,0	780,0	156,0		383,6	176,0	2,6	0,2	127,0	0,0	9,0	3,0
Semana13	TF2_30	0,0065	2000,0	8,1	23,6	670,0	760,0	84,0	30,0	444,4				57,0	0,7	10,4	1,3
Semana14	TF2_30	0,0065	2140,0	8,1	24,6	590,0	710,0	108,0		480,0	149,0	2,2	0,4	97,0	0,0	11,2	2,3
Semana15	TF2_30	0,0065	2330,0	7,8	25,0	400,0	500,0	96,0		746,7				53,0	0,0	17,5	1,2
Semana16	TF2_30	0,0065	1511,0	8,1	23,7	470,0	530,0	84,0	75,0	1743,6	130,0	2,0	0,5	53,0	1,8	40,8	1,2
Semana17	TF2_30	0,0065	1710,0	8,2	24,7	480,0	610,0	156,0	90,0	615,4				130,0	2,1	14,4	3,0
Semana18	TF2_24	0,0081	1213,0	7,9	25,7	375,0	495,0	144,0		512,8				90,0	0,0	15,0	2,6
Semana19	TF2_24	0,0081	1602,0	7,8	26,6	415,0	605,0	156,0	152,5	207,8				83,0	4,4	6,1	2,4
Semana20	TF2_24	0,0081	1534,0	8,1	22,5	450,0	530,0	144,0	185,0	860,8		1,8		57,0	5,4	25,1	1,7
Semana21	TF2_24	0,0081	1512,0	7,8	22,3	420,0	550,0	120,0	172,5	1487,2				63,0	5,0	43,4	1,8
Semana22	TF2_24	0,0081	2416,0	8,1	24,3	500,0	650,0	120,0	157,5	860,8				51,0	4,6	25,1	1,5
Semana23	TF2_24	0,0081	2322,0	8,2	25,2	630,0	690,0	108,0	199,5	1063,3				77,0	5,8	31,0	2,2
Semana24	TF2_18	0,0108	2238,0	8,3	24,5	530,0	660,0	120,0	152,5	842,1				29,0	5,9	32,7	1,1
Semana25	TF2_18	0,0108	2140,0	8,2	23,1	550,0	700,0	180,0	180,0	950,0				74,0	7,0	36,9	2,9
Semana26	TF2_18	0,0108	2300,0	8,0	23,6	560,0	760,0	204,0	100,0	860,8				131,0	3,9	33,5	5,1
Semana27	TF2_18	0,0108	2230,0	8,3	23,4	590,0	780,0	192,0	185,0	1037,0				146,0	7,2	40,3	5,7
Semana28	TF2_18	0,0108	2310,0	8,2	23,1	640,0	790,0	204,0	192,5	779,2				306,0	7,5	30,3	11,9

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS ENTRADAS (AFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO															
		Caudal L/S	Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ ⁻ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles : AGV mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ ⁻ /L	Nitritos mgNO ₂ ⁻ /L	SST mg/L	Carga Orgánica DBO ₅ Kg/h	Carga Orgánica DQO Kg/h	Carga Orgánica SST Kg/h
Semana1	SH2_36	0,0054	2033,0	7,8	30,0	300,0	305,0	340,0	177,5	1333,3	4,8	1,8	0,1	6884,0	3,5	25,9	133,8
Semana2	SH2_36	0,0054	2030,0	7,9	25,0	285,0	405,0	330,0	160,0	718,0	5,0	1,6	0,2	1210,0	3,1	14,0	23,5
Semana3	SH2_36	0,0054	2130,0	7,5	26,6	600,0	765,0	360,0	145,0	693,3	36,8	2,0	0,4	297,0	2,8	13,5	5,8
Semana4	SH2_36	0,0054	2200,0	7,5	25,6	630,0	730,0	240,0	42,0	564,7	26,4	3,8	0,4	290,0	0,8	11,0	5,6
Semana5	SH2_36	0,0054	2063,0	7,2	26,0	490,0	580,0	300,0	21,0	913,6	99,5	2,5	0,2	65,0	0,4	17,8	1,3
Semana6	SH2_36	0,0054	2540,0	7,7	24,4	420,0	520,0	192,0	0,0	1100,0	119,0	2,3	0,3	264,0	0,0	21,4	5,1
Semana7	SH2_36	0,0054	1469,0	7,5	26,0	450,0	500,0	180,0	0,0	820,5		2,1	0,2	56,0	0,0	16,0	1,1
Semana8	SH2_36	0,0054	2380,0	7,4	25,8	640,0	750,0	180,0	0,0	543,2	159,0	1,6	0,2	116,0	0,0	10,6	2,3
Semana9	SH2_36	0,0054	2200,0	8,1	27,5	550,0	660,0	240,0	85,0	839,5				317,0	1,7	16,3	6,2
Semana10	SH2_30	0,0065	2540,0	7,7	23,1	620,0	730,0	84,0	187,5	1113,9	170,0	4,1	0,5	867,0	4,4	26,1	20,3
Semana11	SH2_30	0,0065	2320,0	7,9	26,5	550,0	745,0	84,0	112,5	821,9				223,0	2,6	19,2	5,2
Semana12	SH2_30	0,0065	2290,0	7,8	28,7	600,0	780,0	156,0		383,6	176,0	2,6	0,2	127,0	0,0	9,0	3,0
Semana13	SH2_30	0,0065	2000,0	8,1	23,6	670,0	760,0	84,0	30,0	444,4				57,0	0,7	10,4	1,3
Semana14	SH2_30	0,0065	2140,0	8,1	24,6	590,0	710,0	108,0		480,0	149,0	2,2	0,4	97,0	0,0	11,2	2,3
Semana15	SH2_30	0,0065	2330,0	7,8	25,0	400,0	500,0	96,0		746,7				53,0	0,0	17,5	1,2
Semana16	SH2_30	0,0065	1511,0	8,1	23,7	470,0	530,0	84,0	75,0	1743,6	130,0	2,0	0,5	53,0	1,8	40,8	1,2
Semana17	SH2_30	0,0065	1710,0	8,2	24,7	480,0	610,0	156,0	90,0	615,4				130,0	2,1	14,4	3,0
Semana18	SH2_24	0,0081	1213,0	7,9	25,7	375,0	495,0	144,0		512,8				90,0	0,0	15,0	2,6
Semana19	SH2_24	0,0081	1602,0	7,8	26,6	415,0	605,0	156,0	152,5	207,8				83,0	4,4	6,1	2,4
Semana20	SH2_24	0,0081	1534,0	8,1	22,5	450,0	530,0	144,0	185,0	860,8		1,8		57,0	5,4	25,1	1,7
Semana21	SH2_24	0,0081	1512,0	7,8	22,3	420,0	550,0	120,0	172,5	1487,2				63,0	5,0	43,4	1,8
Semana22	SH2_24	0,0081	2416,0	8,1	24,3	500,0	650,0	120,0	157,5	860,8				51,0	4,6	25,1	1,5
Semana23	SH2_24	0,0081	2322,0	8,2	25,2	630,0	690,0	108,0	199,5	1063,3				77,0	5,8	31,0	2,2
Semana24	SH2_18	0,0108	2238,0	8,3	24,5	530,0	660,0	120,0	152,5	842,1				29,0	5,9	32,7	1,1
Semana25	SH2_18	0,0108	2140,0	8,2	23,1	550,0	700,0	180,0	180,0	950,0				74,0	7,0	36,9	2,9
Semana26	SH2_18	0,0108	2300,0	8,0	23,6	560,0	760,0	204,0	100,0	860,8				131,0	3,9	33,5	5,1
Semana27	SH2_18	0,0108	2230,0	8,3	23,4	590,0	780,0	192,0	185,0	1037,0				146,0	7,2	40,3	5,7
Semana28	SH2_18	0,0108	2310,0	8,2	23,1	640,0	790,0	204,0	192,5	779,2				306,0	7,5	30,3	11,9

Fuente: El Autor

Tabla A.2 Resultados Obtenidos Variables de Salida Sistemas de Tratamiento de ARD.

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS SALIDAS (EFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO											
		Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles: AGV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ /L	Nitritos mgNO ₂ /L	SST mg/L
Semana1	TF1_36	1066	7,8	25,5	165	290	670	45,0	426,7	3,1	1,6	0,0	2217,0
Semana2	TF1_36	1046	7,9	30	190	300	550	182,5	256,4	3,0	1,6	0,2	235,0
Semana3	TF1_36	1050	7,8	27,6	445	575	200	190,0	426,7	11,7	1,2	0,1	38,0
Semana4	TF1_36	1057	7,8	26,5	550	650	240	16,0	376,5	26,8	1,3	0,2	25,0
Semana5	TF1_36	1175	7,9	25	510	580	240	13,5	642,0	13,1	2,0	0,2	36,0
Semana6	TF1_36	2190	8,1	24,3	360	390	96	0,0	100,0	100,0	2,2	0,2	158,0
Semana7	TF1_36	2220	8,2	26,4	430	440	144	0,0	800,0		1,9	0,2	18,0
Semana8	TF1_36	2230	8,2	25,8	500	600	180	0,0	197,5	130,0	2,0	0,4	112,0
Semana9	TF1_36	2200	8,2	27,7	520	590	120	7,5	296,3				117,0
Semana10	TF1_30	2190	8,1	23,3	530	640	144	60,0	202,5	132,0	1,9	0,2	7,0
Semana11	TF1_30	2200	8,1	26,7	590	680	84	35,0	383,6				53,0
Semana12	TF1_30	2130	8,0	26,8	650	820	132		54,8	168,0	2,9	0,2	87,0
Semana13	TF1_30	2000	8,5	23,9	690	740	84	17,5	500,0				50,0
Semana14	TF1_30	2060	8,4	24,8	670	750	72		426,7	160,0	2,6	0,2	43,0
Semana15	TF1_30	2200	7,3	25,4	470	560	84		586,7				3,0
Semana16	TF1_30	1818	8,3	23,2	600	700	84	30,0	51,3	177,0	2,5	0,4	23,0
Semana17	TF1_30	1834	8,3	23,2	540	620	72	35,0	410,3				14,0
Semana18	TF1_24	1170	8,0	26,8	350	450	96		410,3				33,0
Semana19	TF1_24	1500	8,0	25,9	425	530	132	105,0	311,7				33,0
Semana20	TF1_24	1490	8,1	22,7	440	570	96	167,5	455,7		1,8		22,0
Semana21	TF1_24	1577	8,2	22,2	470	575	84	112,5	410,3				38,0
Semana22	TF1_24	2313	8,2	25,2	490	620	96	150,0	658,2				207,0
Semana23	TF1_24	2231	8,2	25,8	530	630	96	194,0	354,4				277,0
Semana24	TF1_18	2903	8,3	25,2	560	730	156	145,0	473,7				38,0
Semana25	TF1_18	2580	8,4	23,1	600	750	144	120,0	550,0				27,0
Semana26	TF1_18	2490	8,0	23,9	545	740	192	202,5	658,2				36,0
Semana27	TF1_18	2430	8,1	24,4	560	750	192	195,0	642,0				64,0
Semana28	TF1_18	2380	8,2	23,4	580	750	180	165,0	363,6				14,0

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS SALIDAS (EFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO											
		Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ ⁻ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles: AGV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ ⁻ /L	Nitritos mgNO ₂ ⁻ /L	SST mg/L
Semana1	SH1_36	1130,00	8,0	30,50	225	335	230	65,00	160,00	3,00	1,58	0,05	1850,00
Semana2	SH1_36	1128,00	8,0	30,30	215	305	240	87,50	384,20	3,00	1,00	0,17	18,00
Semana3	SH1_36	1135,00	8,0	27,30	415	530	200	167,50	320,00	19,50	1,21	0,10	117,00
Semana4	SH1_36	1126,00	8,0	26,90	590	680	560	12,50	611,76	16,10	1,31	0,12	23,00
Semana5	SH1_36	1131,00	7,8	26,50	490	570	240	10,50	543,21	13,45	2,02	0,16	21,00
Semana6	SH1_36	1749,00	8,1	24,20	330	370	108	0,00	150,00	943,00	2,17	0,18	48,00
Semana7	SH1_36	2270,00	8,2	26,40	430	450	144	0,00	697,44		2,22	0,18	14,00
Semana8	SH1_36	1950,00	8,1	25,70	550	630	192	0,00	197,53	137,00	2,31	0,36	94,00
Semana9	SH1_36	2130,00	8,2	27,70	550	630	168	35,00	345,68				70,00
Semana10	SH1_30	1749,00	8,1	23,70	560	650	114	70,00	303,80	154,00	2,14	0,22	43,00
Semana11	SH1_30	2180,00	8,2	26,60	570	730	108	25,00	109,59				83,00
Semana12	SH1_30	2140,00	8,1	26,70	690	840	120		219,18	165,00	2,42	0,18	40,00
Semana13	SH1_30	2120,00	8,4	23,80	690	760	72	30,00	555,56				43,00
Semana14	SH1_30	2060,00	8,4	25,10	620	720	84		266,67	150,00	2,28	0,20	57,00
Semana15	SH1_30	2160,00	8,0	25,20	580	650	72		426,67				13,00
Semana16	SH1_30	1823	8,2	23,4	590	650	84	40,0	512,9	147,0	2,6	0,4	20,0
Semana17	SH1_30	1657	8,2	23,2	530	620	84	37,5	256,4				14,0
Semana18	SH1_24	1135	8,0	26,6	355	435	36		359,0				33,0
Semana19	SH1_24	1525	8,1	25,8	385	505	84	115,0	467,5				15,0
Semana20	SH1_24	1533	8,0	22,5	430	550	120	187,5	354,4		1,9		66,0
Semana21	SH1_24	1550	8,1	22,2	470	560	102	180,0	666,7				46,0
Semana22	SH1_24	2188	8,2	25,3	460	590	96	162,5	658,2				113,0
Semana23	SH1_24	2091	8,0	24,7	430	600	96	189,5	354,4				101,0
Semana24	SH1_18	2850	8,3	25,5	570	720	144	160,0	210,5				40,0
Semana25	SH1_18	2670	8,4	23,2	600	750	144	127,5	550,0				56,0
Semana26	SH1_18	2310	8,0	23,8	550	730	180	202,5	303,8				43,0
Semana27	SH1_18	2080	8,2	24,2	570	750	168	190,0	740,7				61,0
Semana28	SH1_18	2140	8,2	23,5	570	730	180	177,5	467,5				19,0

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS SALIDAS (EFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO											
		Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ ⁻ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles: AGV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ ⁻ /L	Nitritos mgNO ₂ ⁻ /L	SST mg/L
Semana1	TF2_36	1972	8,0	30,3	310	490	240	85,0	266,7	4,0	1,5	0,0	1577,0
Semana2	TF2_36	1982	8,1	30,5	320	460	180	72,5	359,0	3,8	1,3	0,2	222,0
Semana3	TF2_36	1987	8,1	26,5	575	675	300	185,0	426,7	32,6	1,1	0,2	56,0
Semana4	TF2_36	1979	8,1	26	630	710	260	11,0	494,1	41,4	2,1	0,1	32,0
Semana5	TF2_36	1992	7,8	27	560	660	240	12,0	592,6	35,0	2,1	0,2	18,0
Semana6	TF2_36	2330	8,1	24,2	500	580	144	0,0	150,0	301,0	2,5	0,2	70,0
Semana7	TF2_36	2340	8,3	26,3	500	560	180	0,0	759,0		1,8	0,2	62,0
Semana8	TF2_36	2320	8,1	26,1	600	670	192	0,0	197,5	157,0	2,8	0,4	124,0
Semana9	TF2_36	2050	8,2	27,6	610	640	132	90,0	246,9				97,0
Semana10	TF2_30	2330	8,1	23,5	600	690	120	192,5	253,2	167,0	1,9	0,5	113,0
Semana11	TF2_30	2260	8,1	26,7	630	720	84	37,5	328,8				97,0
Semana12	TF2_30	2200	8,1	28,2	650	810	126		0,0	167,0	3,0	0,2	70,0
Semana13	TF2_30	2040	8,5	23,7	700	740	84	215,0	444,4				57,0
Semana14	TF2_30	2210	8,4	25,4	670	770	96		160,0	161,0	2,7	0,6	67,0
Semana15	TF2_30	2080	8,3	25,1	640	770	84		533,3				30,0
Semana16	TF2_30	1702	8,1	23,4	540	620	72	67,5	205,1	151,0	2,5	0,5	23,0
Semana17	TF2_30	1693	8,2	23,1	520	590	108	40,0	359,0				10,0
Semana18	TF2_24	1208	8,0	26,5	365	465	60		512,8				33,0
Semana19	TF2_24	1441	8,0	26,3	485	575	156	195,0	363,6				49,0
Semana20	TF2_24	1570	8,1	22,7	490	590	108	182,5	658,2		1,9		70,0
Semana21	TF2_24	1569	8,2	22,6	445	575	84	190,0	923,8				57,0
Semana22	TF2_24	2217	8,3	25,2	480	660	84	162,5	557,0				13,0
Semana23	TF2_24	2145	8,3	24,6	530	600	72	224,5	405,1				90,0
Semana24	TF2_18	2710	8,2	26,3	560	680	108	152,5	579,0				68,0
Semana25	TF2_18	3010	8,3	23,2	550	650	96	177,5	450,0				64,0
Semana26	TF2_18	2770	8,1	24	575	760	144	192,5	658,2				66,0
Semana27	TF2_18	2650	8,2	26	590	770	132	177,5	642,0				60,0
Semana28	TF2_18	2440	8,3	23,3	640	770	108	132,5	363,6				34,0

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	VARIABLES FISICOQUIMICAS MEDIDAS A LAS SALIDAS (EFLUENTES) DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO											
		Conductividad uS-cm	pH	Temperatura C	Alcalinidad HCO ₃ ⁻ mg/L	Alcalinidad Total CaCO ₃ mg/L	Ácidos Grasos Volátiles: AGV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	Nitrógeno mgN/L	Nitratos mgNO ₃ ⁻ /L	Nitritos mgNO ₂ ⁻ /L	SST mg/L
Semana1	SH2_36	1066	7,8	25,5	165	290	670	45,0	426,7	3,1	1,6	0,0	2217,0
Semana2	SH2_36	1046	7,9	30	190	300	550	182,5	256,4	3,0	1,6	0,2	235,0
Semana3	SH2_36	1050	7,8	27,6	445	575	200	190,0	426,7	11,7	1,2	0,1	38,0
Semana4	SH2_36	1057	7,8	26,5	550	650	240	16,0	376,5	26,8	1,3	0,2	25,0
Semana5	SH2_36	1175	7,9	25	510	580	240	13,5	642,0	13,1	2,0	0,2	36,0
Semana6	SH2_36	2190	8,1	24,3	360	390	96	0,0	100,0	100,0	2,2	0,2	158,0
Semana7	SH2_36	2220	8,2	26,4	430	440	144	0,0	800,0		1,9	0,2	18,0
Semana8	SH2_36	2230	8,2	25,8	500	600	180	0,0	197,5	130,0	2,0	0,4	112,0
Semana9	SH2_36	2200	8,2	27,7	520	590	120	7,5	296,3				117,0
Semana10	SH2_30	2190	8,1	23,3	530	640	144	60,0	202,5	132,0	1,9	0,2	7,0
Semana11	SH2_30	2200	8,1	26,7	590	680	84	35,0	383,6				53,0
Semana12	SH2_30	2130	8,0	26,8	650	820	132		54,8	168,0	2,9	0,2	87,0
Semana13	SH2_30	2000	8,5	23,9	690	740	84	17,5	500,0				50,0
Semana14	SH2_30	2060	8,4	24,8	670	750	72		426,7	160,0	2,6	0,2	43,0
Semana15	SH2_30	2200	7,3	25,4	470	560	84		586,7				3,0
Semana16	SH2_30	1818	8,3	23,2	600	700	84	30,0	51,3	177,0	2,5	0,4	23,0
Semana17	SH2_30	1834	8,3	23,2	540	620	72	35,0	410,3				14,0
Semana18	SH2_24	1170	8,0	26,8	350	450	96		410,3				33,0
Semana19	SH2_24	1500	8,0	25,9	425	530	132	105,0	311,7				33,0
Semana20	SH2_24	1490	8,1	22,7	440	570	96	167,5	455,7		1,8		22,0
Semana21	SH2_24	1577	8,2	22,2	470	575	84	112,5	410,3				38,0
Semana22	SH2_24	2313	8,2	25,2	490	620	96	150,0	658,2				207,0
Semana23	SH2_24	2231	8,2	25,8	530	630	96	194,0	354,4				277,0
Semana24	SH2_18	2903	8,3	25,2	560	730	156	145,0	473,7				38,0
Semana25	SH2_18	2580	8,4	23,1	600	750	144	120,0	550,0				27,0
Semana26	SH2_18	2490	8,0	23,9	545	740	192	202,5	658,2				36,0
Semana27	SH2_18	2430	8,1	24,4	560	750	192	195,0	642,0				64,0
Semana28	SH2_18	2380	8,2	23,4	580	750	180	165,0	363,6				14,0

Fuente: El Autor

Tabla A.3 Resultados Obtenidos como % de Remoción de los Sistemas de Tratamiento de ARD.

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	% DE REMOCIÓN											
		Conductividad	pH	Temperatura	Alcalinidad HCO ₃ ⁻	Alcalinidad Total CaCO ₃	Ácidos Grasos Volátiles: AGV	DBO ₅	DQO	Nitrógeno N	Nitratos NO ₃ ⁻	Nitritos NO ₂ ⁻	SST
Semana1	TF1_36	3,1	-1,3	0,0	-20,0	-50,8	41,2	18,3	8,0	15,8	22,2	23,1	68,4
Semana2	TF1_36	2,5	1,5	-20,0	-22,8	-11,1	39,4	45,3	10,7	23,7	12,1	27,1	80,6
Semana3	TF1_36	6,3	-2,8	2,3	10,8	13,7	11,1	-29,3	46,2	2,2	12,3	21,4	89,9
Semana4	TF1_36	10,2	-2,8	-4,7	4,8	0,0	0,0	52,4	33,3	-11,7	46,2	59,3	80,0
Semana5	TF1_36	4,4	-13,9	-2,3	-12,2	-6,9	13,3	28,6	24,3	63,5	12,1	18,4	84,6
Semana6	TF1_36	7,9	-5,3	-0,4	-23,8	-13,5	18,8		72,7	-21,0	-14,7	3,3	79,5
Semana7	TF1_36	-64,1	-10,8	-0,4	-20,0	-12,0	13,3		51,2		12,3	4,3	28,6
Semana8	TF1_36	5,5	-9,6	-0,8	12,5	13,3	13,3		9,1	2,5	-17,4	-71,4	29,3
Semana9	TF1_36	2,3	-2,0	-0,7	-9,1	0,0	55,0	70,6	11,8				83,3
Semana10	TF1_30	7,9	-5,3	-0,4	-1,6	4,1	-42,9	61,3	90,9	5,9	48,1	31,5	89,6
Semana11	TF1_30	3,0	-3,3	-1,1	-16,4	2,0	28,6	68,9	-66,7				50,7
Semana12	TF1_30	4,4	-5,4	-2,4	-16,7	-3,8	23,1		85,7	2,3	-4,5	17,4	34,6
Semana13	TF1_30	0,0	-5,3	-0,8	0,0	1,3	0,0	-475,0	0,0				24,6
Semana14	TF1_30	-0,9	-2,7	-5,7	-23,7	-11,3	-22,2		55,6	-12,1	-10,9	37,5	17,5
Semana15	TF1_30	3,9	-5,4	-0,4	-52,5	-42,0	37,5		0,0				30,2
Semana16	TF1_30	-14,8	-0,3	0,8	-25,5	-24,5	-14,3	-83,3	82,4	-6,2	8,4	14,0	49,1
Semana17	TF1_30	3,5	0,0	5,7	-10,4	3,3	30,8	-44,4	100,0				89,2
Semana18	TF1_24	-5,4	-2,3	-4,3	-4,0	5,1	58,3		-140,0				-7,8
Semana19	TF1_24	13,2	-2,8	2,6	-6,0	7,4	46,2	-47,5	-325,0				31,3
Semana20	TF1_24	-1,4	0,9	-0,4	-6,7	-5,7	8,3	21,6	100,0		-3,8		26,3
Semana21	TF1_24	-6,1	-4,6	-1,8	-19,0	-12,7	40,0	20,3	93,1				27,0
Semana22	TF1_24	3,6	-2,0	-4,1	-6,0	0,0	20,0	34,9	47,1				39,2
Semana23	TF1_24	4,7	-0,4	2,8	3,2	1,4	22,2	21,3	52,4				61,0
Semana24	TF1_18	-10,0	-0,6	-7,8	-7,5	-7,6	20,0	4,9	56,3				-31,0
Semana25	TF1_18	-7,5	-2,4	0,0	-1,8	7,1	33,3	11,1	42,1				68,9
Semana26	TF1_18	11,3	-0,7	-0,8	-1,8	1,3	11,8	-90,0	64,7				56,5
Semana27	TF1_18	0,9	-0,1	-13,2	-1,7	-1,3	31,3	4,1	28,6				37,7
Semana28	TF1_18	7,8	-1,3	-0,9	3,1	5,1	47,1	-9,1	40,0				91,2

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	% DE REMOCIÓN											
		Conductividad	pH	Temperatura	Alcalinidad HCO ₃ ⁻	Alcalinidad Total CaCO ₃	Ácidos Grasos Volátiles: AGV	DBO ₅	DQO	Nitrógeno N	Nitratos NO ₃ ⁻	Nitritos NO ₂ ⁻	SST
Semana1	SH1_36	44,4	-2,8	-1,7	25,0	-9,8	32,4	63,4	88,0	36,8	12,2	13,5	73,1
Semana2	SH1_36	44,4	-1,3	-21,2	24,6	24,7	27,3	45,3	46,5	39,8	36,3	29,2	98,5
Semana3	SH1_36	46,7	-6,8	-2,6	30,8	30,7	44,4	-15,5	53,8	47,0	39,4	76,2	60,6
Semana4	SH1_36	48,8	-6,8	-5,1	6,3	6,8	-133,3	70,2	-8,3	39,0	66,0	70,4	92,1
Semana5	SH1_36	45,2	-8,1	-1,9	0,0	1,7	20,0	50,0	40,5	86,5	18,2	15,8	67,7
Semana6	SH1_36	31,1	-4,3	0,8	21,4	28,8	43,8		86,4	-692,4	6,5	40,0	81,8
Semana7	SH1_36	-54,5	-9,3	-1,5	4,4	10,0	20,0		15,0		-4,7	21,7	75,0
Semana8	SH1_36	18,1	-9,5	0,4	14,1	16,0	-6,7		63,6	13,8	-43,5	-71,4	19,0
Semana9	SH1_36	3,2	-1,0	-0,7	0,0	4,5	30,0	58,8	58,8				77,9
Semana10	SH1_30	31,1	-4,3	-2,6	9,7	11,0	-35,7	62,7	72,7	9,4	47,2	59,3	95,0
Semana11	SH1_30	6,0	-3,2	-0,4	-3,6	2,0	-28,6	77,8	86,7				62,8
Semana12	SH1_30	6,6	-3,3	7,0	-15,0	-7,7	23,1		42,9	6,3	8,3	21,7	68,5
Semana13	SH1_30	-6,0	-4,3	-0,8	-3,0	0,0	14,3	0,0	-25,0				24,6
Semana14	SH1_30	3,7	-3,7	-2,0	-5,1	-1,4	22,2		44,4	-0,7	-3,6	50,0	41,2
Semana15	SH1_30	7,3	-2,8	-0,8	-45,0	-30,0	25,0		42,9				75,5
Semana16	SH1_30	-20,6	-0,8	1,3	-25,5	-22,6	0,0	46,7	70,6	-13,1	-27,6	20,0	62,3
Semana17	SH1_30	3,1	-0,6	6,1	-10,4	-1,6	46,2	58,3	58,3				89,2
Semana18	SH1_24	6,4	-2,2	-3,5	5,3	12,1	75,0		30,0				63,3
Semana19	SH1_24	4,8	-3,7	3,0	7,2	16,5	46,2	24,6	-125,0				81,9
Semana20	SH1_24	0,1	1,4	0,0	4,4	-3,8	16,7	-1,4	58,8		-5,4		-15,8
Semana21	SH1_24	-2,5	-3,4	0,4	-11,9	-1,8	15,0	-4,3	55,2				27,0
Semana22	SH1_24	9,44	-1,85	-4,12	8,00	9,23	20,00	-3,17	23,53				-121,57
Semana23	SH1_24	9,95	3,40	1,98	31,75	13,04	11,11	5,01	66,67				-31,17
Semana24	SH1_18	-27,35	0,48	-4,08	-7,55	-9,09	-20,00	-4,92	75,00				-37,93
Semana25	SH1_18	-24,77	-1,94	-0,43	-9,09	-7,14	20,00	29,17	42,11				24,32
Semana26	SH1_18	-0,43	0,37	-0,85	1,79	3,95	11,76	-102,50	64,71				67,18
Semana27	SH1_18	6,73	1,21	-3,42	3,39	3,85	12,50	-2,70	28,57				58,22
Semana28	SH1_18	7,36	-0,12	-1,73	10,94	7,59	11,76	7,79	40,00				93,79

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	% DE REMOCIÓN											
		Conductividad	pH	Temperatura	Alcalinidad HCO ₃ ⁻	Alcalinidad Total CaCO ₃	Ácidos Grasos Volátiles: AGV	DBO ₅	DQO	Nitrógeno N	Nitratos NO ₃ ⁻	Nitritos NO ₂ ⁻	SST
Semana1	TF2_36	3,0	-2,6	-1,0	-3,3	-60,7	29,4	52,1	80,0	16,2	17,8	19,2	77,1
Semana2	TF2_36	2,4	-2,0	-22,0	-12,3	-13,6	45,5	54,7	50,0	23,3	17,2	25,0	81,7
Semana3	TF2_36	6,7	-8,4	0,4	4,2	11,8	16,7	-27,6	38,5	11,4	43,5	61,9	81,1
Semana4	TF2_36	10,0	-8,4	-1,6	0,0	2,7	-8,3	73,8	12,5	-56,8	46,4	81,5	89,0
Semana5	TF2_36	3,4	-8,9	-3,8	-14,3	-13,8	20,0	42,9	35,1	64,8	13,4	21,1	72,3
Semana6	TF2_36	8,3	-5,3	0,8	-19,0	-11,5	25,0		86,4	-152,9	-5,6	30,0	73,5
Semana7	TF2_36	-59,3	-10,0	-1,2	-11,1	-12,0	0,0		7,5		13,2	4,3	-10,7
Semana8	TF2_36	2,5	-8,8	-1,2	6,3	10,7	-6,7		63,6	1,3	-72,0	-90,5	-6,9
Semana9	TF2_36	6,8	-1,5	-0,4	-10,9	3,0	45,0	-5,9	70,6				69,4
Semana10	TF2_30	8,3	-5,3	-1,7	3,2	5,5	-42,9	-2,7	77,3	1,8	53,3	14,8	87,0
Semana11	TF2_30	2,6	-3,0	-0,8	-14,5	3,4	0,0	66,7	60,0				56,5
Semana12	TF2_30	3,9	-4,0	1,7	-8,3	-3,8	19,2		100,0	5,1	-15,2	13,0	44,9
Semana13	TF2_30	-2,0	-5,5	-0,4	-4,5	2,6	0,0	-616,7	0,0				0,0
Semana14	TF2_30	-3,3	-3,5	-3,3	-13,6	-8,5	11,1		66,7	-8,1	-22,7	-47,5	30,9
Semana15	TF2_30	10,7	-6,2	-0,4	-60,0	-54,0	12,5		28,6				43,4
Semana16	TF2_30	-12,6	-0,3	1,3	-14,9	-17,0	14,3	10,0	88,2	-16,2	-22,7	10,0	56,6
Semana17	TF2_30	1,0	-0,4	6,5	-8,3	3,3	30,8	55,6	41,7				92,3
Semana18	TF2_24	0,4	-1,9	-3,1	2,7	6,1	58,3		0,0				63,3
Semana19	TF2_24	10,0	-3,5	1,1	-16,9	5,0	0,0	-27,9	-75,0				41,0
Semana20	TF2_24	-2,3	0,6	-0,9	-8,9	-11,3	25,0	1,4	23,5		-4,3		-22,8
Semana21	TF2_24	-3,8	-4,2	-1,3	-6,0	-4,5	30,0	-10,1	37,9				9,5
Semana22	TF2_24	8,2	-2,1	-3,7	4,0	-1,5	30,0	-3,2	35,3				74,5
Semana23	TF2_24	7,6	-1,1	2,4	15,9	13,0	33,3	-12,5	61,9				-16,9
Semana24	TF2_18	-21,1	1,6	-7,3	-5,7	-3,0	10,0	0,0	31,3				-134,5
Semana25	TF2_18	-40,7	-0,6	-0,4	0,0	7,1	46,7	1,4	52,6				13,5
Semana26	TF2_18	-20,4	-0,6	-1,7	-2,7	0,0	29,4	-92,5	23,5				49,6
Semana27	TF2_18	-18,8	0,5	-11,1	0,0	1,3	31,3	4,1	38,1				58,9
Semana28	TF2_18	-5,6	-1,5	-0,9	0,0	2,5	47,1	31,2	53,3				88,9

# Semana de Seguimiento	Código Tratamiento (Combinación de Niveles de Factores)	% DE REMOCIÓN											
		Conductividad	pH	Temperatura	Alcalinidad HCO ₃ ⁻	Alcalinidad Total CaCO ₃	Ácidos Grasos Volátiles: AGV	DBO ₅	DQO	Nitrógeno N	Nitratos NO ₃ ⁻	Nitritos NO ₂ ⁻	SST
Semana1	SH2_36	47,6	-0,3	15,0	45,0	4,9	-97,1	74,6	68,0	35,4	11,1	13,5	67,8
Semana2	SH2_36	48,5	0,0	-20,0	33,3	25,9	-66,7	-14,1	64,3	39,8	0,6	29,2	80,6
Semana3	SH2_36	50,7	-3,6	-3,8	25,8	24,8	44,4	-31,0	38,5	68,2	40,5	79,8	87,2
Semana4	SH2_36	52,0	-3,6	-3,5	12,7	11,0	0,0	61,9	33,3	-1,5	65,9	61,7	91,4
Semana5	SH2_36	43,0	-9,7	3,8	-4,1	0,0	20,0	35,7	29,7	86,9	19,4	21,1	44,6
Semana6	SH2_36	13,8	-4,8	0,4	14,3	25,0	50,0		90,9	16,0	3,9	40,0	40,2
Semana7	SH2_36	-51,1	-9,7	-1,5	4,4	12,0	20,0		2,5		12,3	26,1	67,9
Semana8	SH2_36	6,3	-10,1	0,0	21,9	20,0	0,0		63,6	18,2	-22,4	-76,2	3,4
Semana9	SH2_36	0,0	-0,9	-0,7	5,5	10,6	50,0	91,2	64,7				63,1
Semana10	SH2_30	13,8	-4,5	-0,9	14,5	12,3	-71,4	68,0	81,8	22,4	53,8	70,4	99,2
Semana11	SH2_30	5,2	-2,8	-0,8	-7,3	8,7	0,0	68,9	53,3				76,2
Semana12	SH2_30	7,0	-2,6	6,6	-8,3	-5,1	15,4		85,7	4,5	-8,0	34,8	31,5
Semana13	SH2_30	0,0	-5,2	-1,3	-3,0	2,6	0,0	41,7	-12,5				12,3
Semana14	SH2_30	3,7	-3,8	-0,8	-13,6	-5,6	33,3		11,1	-7,4	-18,6	42,5	55,7
Semana15	SH2_30	5,6	6,2	-1,6	-17,5	-12,0	12,5		21,4				94,3
Semana16	SH2_30	-20,3	-2,1	2,1	-27,7	-32,1	0,0	60,0	97,1	-36,2	-21,2	18,0	56,6
Semana17	SH2_30	-7,3	-1,5	6,1	-12,5	-1,6	53,8	61,1	33,3				89,2
Semana18	SH2_24	3,5	-2,3	-4,3	6,7	9,1	33,3		20,0				63,3
Semana19	SH2_24	6,4	-3,3	2,6	-2,4	12,4	15,4	31,1	-50,0				60,2
Semana20	SH2_24	2,9	0,0	-0,9	2,2	-7,5	33,3	9,5	47,1				61,4
Semana21	SH2_24	-4,3	-4,9	0,4	-11,9	-4,5	30,0	34,8	72,4				39,7
Semana22	SH2_24	4,3	-1,4	-3,7	2,0	4,6	20,0	4,8	23,5				-305,9
Semana23	SH2_24	3,9	0,6	-2,4	15,9	8,7	11,1	2,8	66,7				-259,7
Semana24	SH2_18	-29,7	0,6	-2,9	-5,7	-10,6	-30,0	4,9	43,8				-31,0
Semana25	SH2_18	-20,6	-1,9	0,0	-9,1	-7,1	20,0	33,3	42,1				63,5
Semana26	SH2_18	-8,3	0,2	-1,3	2,7	2,6	5,9	-102,5	23,5				72,5
Semana27	SH2_18	-9,0	1,5	-4,3	5,1	3,8	0,0	-5,4	38,1				56,2
Semana28	SH2_18	-3,0	0,2	-1,3	9,4	5,1	11,8	14,3	53,3				95,4

Fuente: El Autor

ANEXO B.

Validación de Supuestos para variables respuesta % de remoción de DBO₅; DQO y SST para los niveles de los dos factores en estudio tomados de manera independiente.

Tabla B1. P-valores de las variables respuesta, en los niveles de cada factor, para validación de Normalidad, Homocedasticidad e independencia. Factores Independientes.

FACTORES	NIVELES	Número de Tratamientos válidos	%Remoción_DBO ₅			%Remoción_DQO			%Remoción_SST		
			Prueba Normalidad, Shapiro-Wilk	Prueba Independencia. Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad : Prueba de Levene, (basada en la mediana)	Prueba Normalidad, Shapiro-Wilk	Prueba Independencia. Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad : Prueba de Levene, (basada en la mediana)	Prueba Normalidad, Shapiro-Wilk	Prueba Independencia. Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad : Prueba de Levene, (basada en la mediana)
Tipo de Reactor (TanqueFiltro o SistemaHíbrido)	TF1	21	0,000	0,026	0,655	0,000	0,563	0,317	0,022	0,178	0,530
	SH1	21	0,013	0,182		0,000	0,847		0,001	0,563	
	TF2	21	0,000	0,646		0,006	1,000		0,000	0,034	
	SH2	21	0,092	0,182		0,060	0,563		0,000	0,563	
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	18h	20	0,000	1,000	0,075	0,410	0,516	0,026	0,002	0,818	0,009
	24h	20	0,297	0,108		0,000	0,835		0,000	0,531	
	30h	20	0,000	1,000		0,014	0,857		0,046	0,007	
	36h	24	0,014	0,835		0,964	0,398		0,478	0,237	

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición de resultados explorar, estadísticos descriptivos y pruebas No paramétricas Rachas.

De acuerdo a la interpretación de los P-valores , frente al nivel de significancia $\alpha = 0,05$; se resaltan en naranja para las tablas B1 y B2, los valores que hacen que no se acepte la hipótesis nula (H₀) de Normalidad y homocedasticidad.

En la tabla B1, se observa que la prueba de independencia , resulta válida para la gran mayoría de los grupos (p-valores>0,05), exceptuando solamente a TF1 en la variable % de remoción DBO₅ y el TRH de 30h en la variable % de remoción SST; también con los

factores tomados de manera independiente, los grupos en su mayoría no cumplen con el supuesto de normalidad, no se cumple homogeneidad de varianzas para el caso de los TRH en las variables % de remoción de DQO y % de Remoción de SST.

Tabla B2. P-valores de las variables respuesta, en los niveles de cada factor, para validación de Normalidad, Homocedasticidad e independencia. Factores Interdependientes.

FACTORES Y NIVELES			%Remoción_DBO ₅				%Remoción_DQO				%Remoción_SST			
Bloque	Tipo de Reactor: (Tanque Y Filtro o Sistema Híbrido)	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	Número de Tratamientos (combinación de Niveles): válidos	Prueba Normalidad: Shapiro-Wilk	Prueba Independencia: Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad: Prueba de Levene, (basada en la media)	Número de Tratamientos (combinación de Niveles): válidos	Prueba Normalidad: Shapiro-Wilk	Prueba Independencia: Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad: Prueba de Levene, (basada en la media)	Número de Tratamientos (combinación de Niveles): válidos	Prueba Normalidad: Shapiro-Wilk	Prueba Independencia: Rachas, basado en la Mediana (Estadístico Z Bilateral)	Homocedasticidad: Prueba de Levene, (basada en la media)
1	TF1	18h	5	0,010	0,913		5	0,835	0,326		5	0,461	0,913	
		24h	5	0,011	0,913		6	0,058	1,000		6	0,593	1,000	
		30h	5	0,070	1,000		8	0,122	1,000		8	0,139	0,252	
		36h	6	0,653	0,171		9	0,158	0,160		9	0,003	0,495	
	SH1	18h	5	0,068	0,913		5	0,576	0,326		5	0,613	0,326	
		24h	5	0,056	1,000		6	0,007	1,000		6	0,708	1,000	
		30h	5	0,309	1,000	0,000	8	0,080	0,252	0,000	8	0,768	0,252	0,000
		36h	6	0,029	0,648		9	0,614	0,445		9	0,106	0,137	
	TF2	18h	5	0,051	0,913		5	0,444	0,913		5	0,120	0,326	
		24h	5	0,666	1,000		6	0,198	0,171		6	0,457	1,000	
		30h	5	0,002	0,913		8	0,895	0,056		8	0,724	0,252	
		36h	6	0,301	1,000		9	0,637	1,000		9	0,001	0,495	
	SH2	18h	5	0,084	1,000		5	0,749	1,000		5	0,134	0,913	
		24h	5	0,133	0,326		6	0,285	1,000		6	0,006	0,171	
		30h	5	0,152	1,000		8	0,660	0,703		8	0,503	1,000	
		36h	6	0,482	0,648		9	0,602	1,000		9	0,326	0,495	

Fuente: Programa estadístico SPSS, edición de resultados explorar, estadísticos descriptivos y pruebas No paramétricas Rachas.

En el caso de la tabla B2 con los factores tomados de manera interdependiente, la principal observación de los supuestos es el cumplimiento de normalidad y de independencia en la mayoría de los casos, pero no se cumple con la homogeneidad de varianzas.

ANEXO C.

Prueba No paramétrica de Krukall Wallis para rangos promedios.

Se realiza la prueba no paramétrica de Kruskal –Wallis, la cual es de libre distribución y no exige el cumplimiento de supuestos de normalidad y homocedasticidad, supuestos que no se cumplieron en su totalidad, previos a los análisis de varianza (ANOVA); se busca además con esta prueba, confirmar algunas de las diferencias o similitudes entre promedios de % de remoción, observadas con las pruebas paramétricas realizadas.

Tabla C1. Rangos Promedios por Variables Respuestas según Tipos de Reactores.

Tipo de Reactor (Tanque Filtro o Sistema Híbrido)	Número de Tratamientos Válidos	Rango promedio % Remoción DBO ₅	Rango promedio % Remoción DQO	Rango promedio % Remoción SST
TF1	21	38,6	53,5	54,4
SH1	21	46,0	60,9	60,1
TF2	21	36,0	55,6	52,5
SH2	21	49,4	56,0	58,9

Fuente: SPSS-Excel

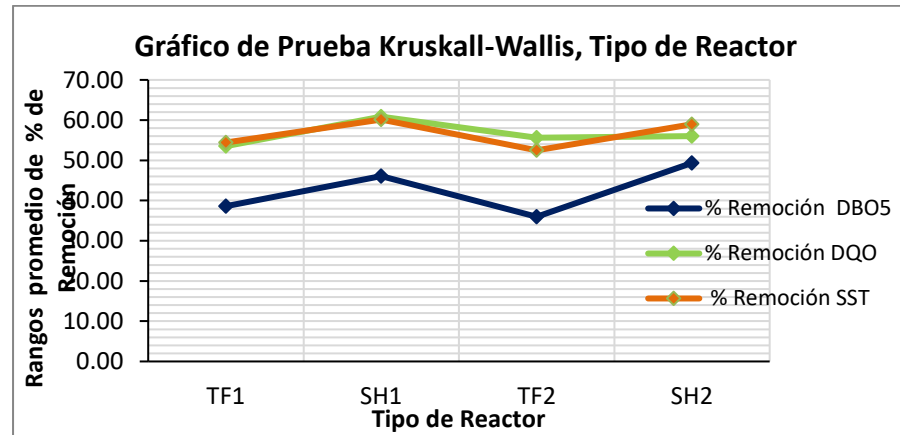


Figura C1. Gráficos de líneas para rangos promedios de los % de **Remoción de DBO₅, DQO y SST** VS Tipo Reactor- Tempos de Retención Hidráulica. Fuente SPSS

Se muestra la tabla de C1 de rangos promedio de los % de remoción según tipo de reactor y la gráfica de líneas de la figura C1, donde se presentan las gráficas simultáneas de las tres variables respuestas en estudio vs las configuraciones de los reactores. La información fue obtenida mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. Es evidente que, por la magnitud de los valores obtenidos en la tabla, no hay en general diferencias marcadas entre los rangos promedios, para cada una de las variables respuesta, en relación al tipo de reactores, salvo alguna diferencia a favor de los sistemas híbridos y con relación a la variable % de remoción de DBO₅, tal como lo mostraron algunas conclusiones de las pruebas ANOVA.

Tabla C2. Rangos Promedio por Variables Respuestas según Tiempos de Retención Hidráulica:

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	Número de Tratamientos Válidos	Rango promedio %Remoción DBO ₅	Número de Tratamientos Válidos	Rango promedio %Remoción DQO	Número de Tratamientos Válidos	Rango promedio %Remoción SST
18h	20	29,0	20	53,9	20	52,1
24h	20	33,5	24	47,4	24	34,3
30h	20	51,9	32	64,8	32	60,0
36h	24	53,4	36	56,6	36	70,6

Fuente: SPSS-Excel

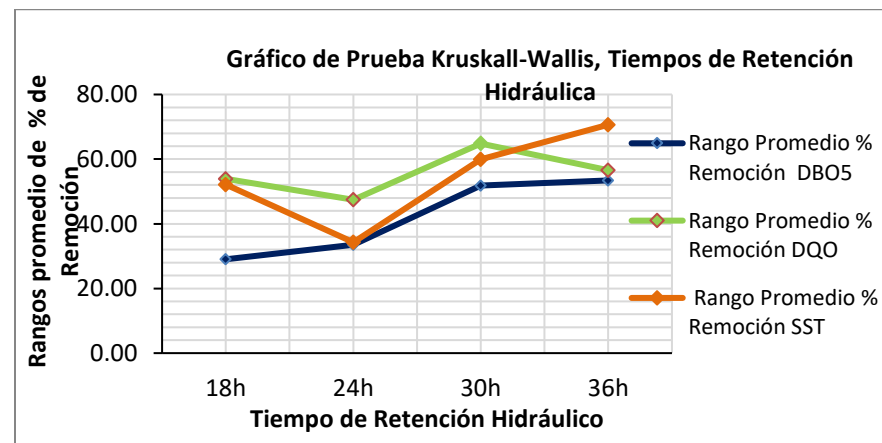


Figura C2. Gráficos de líneas para rangos promedio de los % de Remoción de DBO₅, DQO y SST VS Tiempo de Retención Hidráulica. Fuente SPSS-Excel

La tabla C2, muestra los rangos promedio de las variables respuesta, según los tiempos de retención hidráulica aplicados. Se presenta también, en la figura C2, los gráficos de líneas, para los rangos promedio de las tres variables respuestas, frente a los tiempos de retención hidráulica, es evidente que los tiempos de 36h y 30h producen en general valores de rangos promedios de % de remoción, más altos que 24h y 18h; además en lo relacionado con la variable respuesta de % de remoción de SST, el rango promedio correspondiente a 24h es claramente más bajo que el TRH de 18h, tal como lo mostraron las gráficas de perfiles de la figura 21.

Como se observó en los análisis ANOVA, el tiempo de retención hidráulica tiene efecto sobre las remociones en contraste con el factor tipo de reactor, que no muestra diferencias claras entre % de remoción, también es evidente, que al menos los dos TRH más altos aplicados, producen % de remoción mayores.